

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia - Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Mathématiques et Informatique



Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en
informatique

Option : Systèmes Intelligents

Thème

Amélioration de l'efficacité énergétique pour les RCSF via une méthode métaheuristique

Préparé par

DJERIFILI / Somia et FDOUL / Amira

Membres de jury d'évaluation :

Dr.DAHOU Abdelghani	Président	Univ. Adrar
Dr. KA KADDI Mohammed	Encadreur	Univ. Adrar
Dr.BENATIALLAH Djelloul	Examineur	Univ. Adrar

Année Universitaire 2021/2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and
Scientific Research
University Ahmed Draia of Adrar
The central library



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة أحمد دراية- أدرار
المكتبة المركزية
مصلحة البحث البليوغرافي

شهادة الترخيص بالإيداع

KADDI Mohammed

انا الأستاذ(ة) : د. قاضي محمد

المشرف مذكرة الماستر الموسومة بـ :

Amélioration de l'efficacité énergétique pour les RCSF via une méthode
métaheuristique

من إنجاز الطالب(ة) جريفي سمية DJERIFILI Somia

و الطالب(ة): فدل أميرة FDOUL Amira

كلية : العلوم و التكنولوجيا

القسم : الرياضيات و الاعلام الالي

التخصص: أنظمة ذكية

تاريخ تقييم / مناقشة: 2022/06/18

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

- امضاء المشرف:

03 جويلية 2022

مساعد رئيس القسم:

أ. كحيلي محمد
رئيس قسم الرياضيات و الاعلام الالي



ملاحظة: لا تقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil permettent de répondre aux besoins de nombreuses applications de surveillance, en raison de leur faible coût, de leur capacité à communiquer sans fil et de leur facilité de déploiement. La conservation d'énergie est l'une des plus importantes problématiques rencontrées par ce type de réseaux. Dans ce mémoire, nous nous suggérons un protocole éco-énergétique pour améliorer l'efficacité énergétique des RCSF appelé IEE-GRASP. Ce dernier est basé sur la méthode métaheuristique GRASP pour minimiser la consommation d'énergie et améliorer l'efficacité énergétique du réseau en utilisant l'environnement MATLAB. Les résultats de la simulation ont montré que le protocole IEE-GRASP proposé est plus efficace en termes de consommation d'énergie et de la durée de vie du réseau.

Mots-clés: Réseaux de capteurs sans fil, GRASP, IEE-GRASP, consommation d'énergie, énergie résiduelle, durée de vie, efficacité énergétique.

Abstract

Wireless sensor networks help meet the needs of many surveillance applications, due to their low cost, ability to communicate wirelessly, and ease of deployment. Energy conservation is one of the most important problems encountered by this type of networks. In this thesis, we suggest an energy-efficient protocol to improve the energy efficiency of RCSF called IEE-GRASP. The latter is based on the GRASP metaheuristic method to minimize the energy consumption and improve the energy efficiency of the network using the MATLAB environment. The simulation results showed that the proposed IEE-GRASP protocol is more efficient in terms of power consumption and network lifetime.

Keywords: Wireless sensor networks, GRASP, IEE-GRASP, energy consumption, residual energy, lifetime, energy efficiency.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier **ALLAH** de nous avoir donné la force, la patience et le courage pour arriver à accomplir ce travail. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à notre cher enseignant et encadrant **Dr. KADDI Mohamed** pour son encadrement, son suivi et pour son énorme soutien durant toute la période de ce travail.

Mes remerciements vont droit à tous mes enseignants et à l'ensemble du corps professoral du département Mathématiques et Informatique. J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres de jury de bien vouloir accepter d'évaluer ce modeste travail. Je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DJERIFILI Soumaya et FDOUL Amira

Dédicaces

Je remercie Dieu de m'avoir donné le courage pour accomplir ce modeste travail que je dédie à:

- *À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre ,, à cet source de tendresse, de patience et de générosité,, à ma mère **zohra** ;*
- *À qui se sa sacrifié pour que je puisse achever mes études.. à mon père **elhadj** ;*
- *À Mon fiancé **abd el hafiid** que m'ont donné la force de continuer.. et pour sa compréhension et ces encouragements ;*
- *À Mon adorable sœur et mes frères;*
- *À Ma chère amie et binôme **amira** ;*
- *À Toute ma famille : **ma grande mère** Qui m'a comblé de son amour et de ses prières , Mon cher oncle **Ahmed** et ma tante **Khadija***
- *À Toute la promo **Systèmes Intelligents 2021/2022** ;*
- *À Je vais simplement dire :
«Aux personnes qui m'aiment, aux personnes que j'aime,
je dédie ce travail »*

Soumaya

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour:

- *À la source de l'amour et du soutien constant dans la supplication, mon **cher père** et ma **chère mère**, que Dieu les bénisse pour moi.*
- *À ceux qui m'ont soutenu moralement, mes frères **Charaf El-Dine, Rania** et **Saida**, et tous les membres de ma grande famille.*
- *À tous mes chers amis et proches pour m'avoir aidé dans mes moments difficiles.*
- *Sans oublier mon professeur, **Dr. KADDI Mohammed**, pour ses précieux conseils tout au long de la période de réalisation de ce travail.*

Amira

Sommaire

Résumé

Dédicaces

Remerciements

Introduction générale 1

Chapitre1: Généralité sur les réseaux capteurs sans fil

1.1 Introduction 3

1.2 Capteur 3

1.2.1 Définition 3

1.2.2 Les types de capteur 3

1.2.2.1 Soit selon la sortie de signal 3

1.2.2.2 Soit selon l'alimentation en énergie électrique 4

1.3. Capteur sans fil 4

1.3.1 Définition 4

1.3.2 Types de capteur sans fil 4

1.4 Architecture d'un capteur 6

1.4.1 Architecture matérielle 6

1.4.2 Architecture Logicielle 7

1.5 Réseaux de capteurs sans fil 9

1.5.1 Aperçu historique sur la recherche sur les RCSF 9

1.5.2 Définition 10

1.5.3 Architecture d'un RCSF 10

1.5.4 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil 11

1.5.5 Architecture protocolaire 13

1.5.5.1 Couche physique 13

1.5.5.2 Couche liaison de données 13

1.5.5.3 Couche réseau 13

1.5.5.4 Couche de transport 13

1.5.5.5 Couche application 14

1.5.5.6 Plan de gestion de l'énergie 14

1.5.5.7 Plan de gestion 14

1.5.5.8 Plan de gestion des tâches 14

1.6 Facteurs de conception des réseaux de capteurs.....	14
1.6.1 Adaptabilité	14
1.6.2 Topologie de réseau	14
1.6.3 Média de transmission.....	14
1.6.4 Consommation d'énergie.....	14
1.7 Classification des RCSF.....	15
1.8 Topologie des RCSF [21]	17
1.9 Perspective de recherche et challenges dans les RCSF	17
1.10 Domaines d'application des RCSF.....	19
1.11 Limites des RCSF.....	20
1.12 Conclusion.....	21

Chapitre2: Economie d'énergie dans les RCSFs

2.1 Introduction.....	23
2.2 Notions.....	23
2.3 Où gaspiller l'énergie?.....	25
2.3.1 Energie de capture	25
2.3.2 Energie de traitement	26
2.3.3 Energie de communication.....	26
2.4 Facteur de sur consommation d'énergie	26
2.5 Techniques de conservation d'énergie.....	27
2.5.1 Techniques du Duty-cycling:.....	28
2.5.1.1 Protocole de contrôle de topologie.....	28
2.5.1.2 Protocoles de gestion d'énergie	29
2.5.2 Approches orientées donnée.....	30
2.5.2.1 Technique de Réduire les données.....	31
2.5.2.2 Acquisition de données efficace en énergie	31
2.5.3 Mobilité.....	32
2.6 Conclusion.....	33

Chapitre3: Protocoles du routage dans les RCSFs

3.1 Introduction	35
3.2 Définition de routage	35
3.3 Classification des protocoles de routage	35

3.3.1 Classification selon la structure du réseau	37
3.3.1.1 Les protocoles de routage plat (flat based-routing)	37
3.3.1.2 Les protocoles hiérarchiques.....	37
3.3.1.3 Les protocoles de routage avec localisation géographique	38
3.4 Exemples des protocoles de routage hiérarchiques	39
3.4.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy).....	39
3.4.2 PEGASIS.....	41
3.6. Conclusion	43

Chapitre4: Algorithme GRASP et travaux liées

4.1 Introduction.....	45
4.2 Historique.....	45
4.3 Définition de l'algorithme GRASP.....	45
4.4 Principe de GRASP	45
4.4.1 fonctionnement.....	45
4.4.1 Phase de construction	46
4.4.2 Phase de Recherche local.....	48
4.4.3 Domaines d'application	49
4.4.4 Avantages et Inconvénient	49
4.5 Travaux liées	49
4.5.1 GRASP pour la Sélection des Clusterheads dans WSN:.....	49
4.5.2 GRASP + PR (Path Relinking):.....	51
4.5.3 MIP (Mixed Integer Programming):.....	53
4.5.4 Comparaison entre les travaux liés	55
4.6 Conclusion	56

Chapitre5: Contribution & Implémentation

5.1 Introduction.....	58
5.2 L'architecture de la contribution proposée	58
5.2.1 phase d'initialisation.....	58
5.2.1.1 Organigramme de la Phase d'initialisation	58
5.2.1.2 Algorithme détaillé de la Phase d'initialisation	58
5.2.2 phase de construction	59
5.2.2.1 Organigramme de la Phase de Construction.....	60

5.2.2.2 Algorithme détaillé de la Phase de Construction	61
5.2.3 phase de recherche locale.....	62
5.2.3.1 Organigramme de la Phase de recherche local	62
5.2.3.2 Algorithme détaillé de la Phase de recherche local	63
5.3 Implémentation	64
5.3.1 Choix du langage de programmation	64
5.3.2 Description de l'interface de simulation.....	64
5.4 Modèle d'énergie	67
5.5 Résultats & Analyse	68
5.5.1 Résultats.....	68
5.5.2 Analyse des resultants	71
5.6 Conclusion	71
Conclusion générale.....	73
Références :	75

Liste des figures

Chapitre1: Généralité sur les réseaux capteurs sans fil	
Figure 1.1 : Schéma représentatif du mécanisme de traduction d'un capteur	3
Figure 1.2: Exemple d'un Capteur .	4
Figure 1.3: Schéma représentant quelques types de capteurs.	5
Figure 1.4: Evolution des capteurs	5
Figure 1.5: Architecture matérielle d'un capteur sans fil.	6
Figure 1.6: Structure TinyOS .	8
Figure 1.7: Structure Contiki .	9
Figure 1.8: Réseaux de capteur sans fil	10
Figure 1.9: Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fil.	11
Figure 1.10: Architecture protocolaire.	13
Figure 1.11: Classification des RCSFs.	15
Figure 1.12: Quelques domaines d'application des RCSF.	20
Chapitre2: Economie d'énergie dans les RCSFs	
Figure 2.1 : Représentation du la variation de la durée de vie dans les RCSF.	24
Figure 2.2 : Schéma représentatif du couverture de zone dans les RCSF.	24
Figure 2.3 : Schéma représentatif du la connectivité dans les RCSF.	25
Figure 2.4 : Méthodes de conservation d'énergie.	28
Chapitre3: Protocoles du routage dans les RCSFs	
Figure 3.1 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau.	36
Figure 3.2: Protocoles de routage pour les RCSF selon le type de protocole.	36
Figure 3.3 : Protocoles de routage pour les RCSF selon l'établissement de la route.	36
Figure 3.4 : Routage plat.	37
Figure 3.5 : Routage hiérarchique.	38
Figure 3.6 : Routage basé sur la localisation	39
Figure 3.7 : Organigramme de l'algorithme de formation de clusters distribué pour LEACH.	40
Figure 3.8 : Algorithme de routage LEACH.	41
Figure 3.9 : Illustration de protocole PEGASIS .	42
Chapitre4: Algorithme GRASP et travaux liées	
Figure 4.1: Organigramme générale de GRASP.	46
Figure 4.2: Influence du paramètre.	47
Figure 4.3: Pseudo code de la phase de construction.	47

Figure 4.4: Pseudo code de la recherche locale.	48
Figure 4.5: Description de la phase constructive et du local recherche de l'algorithme	50
Figure 4.6 : représentation de la solution.	51
Figure 4.7: Phase d'intensification Path Relinking.	53
Chapitre5: Contribution & Implémentation	
Figure 5. 1 : Organigramme de la phase d'initialisation.	58
Figure 5. 2: Algorithme de la phase d'initialisation.	59
Figure 5. 3: Organigramme de la phase de construction.	60
Figure 5. 4: Algorithme de la phase de construction .	61
Figure 5. 5: Organigramme de la phase de recherche local.	62
Figure 5. 6: Algorithme de la phase de recherche local.	63
Figure 5.7 : Interface de notre application.	65
Figure 5.8 : Zone de simulation.	66
Figure 5.9 : Légende.	66
Figure 5.10 : Simulation.	66
Figure 5.11 : Résultats de simulation.	67
Figure 5.12 : Modèle de dissipation de l'énergie .	67
Figure 5.13: Comparaison en termes de la durée de vie.	69
Figure 5.14: Comparaison en termes de nombre des nœuds morts par tour.	70
Figure 5.15: Comparaison en termes de nombre des nœuds vivants par tour.	70
Figure 5.16: Comparaison en termes de l'énergie résiduelle.	71

Liste des tableaux

Tableau 4. 1: Comparaison entre les travaux liés.	55
Tableau 5.1: Caractéristiques matérielles	64
Tableau 5.2: Résultats de simulations.	69

Liste des abréviations

ADC :	Analog Digital Converter
CH :	Cluster-Head
CPU:	Central Processing Unit
CSMA :	Carrier Sense Multiple Access
DSN :	Distributed Sensor Network
GAF :	Geographic Adaptive Fidelity
GPS :	Global Positioning System
GRASP :	Greedy Random Adaptive Search Procedure
IEE-GRASP:	Improved Energy Efficiency-GRASP
LEACH:	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MAC :	Medium Access Control
MECN :	Minimum Energy Communication Network .
MEMS :	Micro Electro-Mechanical System
MIP :	Mixed Integer Programming
NL :	Nœud-Leader
PEGASIS :	Power-Efficient GAttering in Sensor Information Systems
PR :	Path Relinking
RCSF :	Réseau de Capteurs Sans Fil
STEM :	Sparse Topology and Energy Management
SB :	Station de Base
SPIN:	Sensor Protocol for Information via Negotiation
TDMA :	Time Division Multiplexing Access.
TEEN :	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
TinyOS :	Tiny Operating System
TDMA :	Time Division Multiplexing Access.
UCT:	Unite de traitement
WSN :	Wireless Sensor Network
Z_MAC :	Zebra MAC

Introduction

générale

Introduction générale

De nos jours, des nombreuses utilisations des moyens technologiques, y compris des moyens de communication, qui font désormais partie intégrante de notre vie quotidienne et sont utilisés dans tous les domaines, y compris la médecine, l'éducation et d'autres qui ont facilité et amélioré leurs travaux. La plupart de ces dispositifs consistent en un capteur qui capter, traiter et transférer des informations d'un nœud à un autre, de sorte que ces travaux consomment de l'énergie, et la plupart de ces dispositifs sont équipés d'une batterie non renouvelable.

Le but de ce mémoire est choisi un protocole de routage pour améliorer l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil dans un contexte sans fil hiérarchique. Je vais pour cela faire une étude deux cas, dans la quelle je vais tester deux protocoles au niveau de consommation d'énergie et la transmission des paquets. Cela me conduira à réfléchir qui consomme moins d'énergie que l'autre.

Dans cette mémoire, j'ai effectué les testes sur les deux protocoles IEE-GRASP et LEACH , afin de déterminer lequel des deux capteurs était le mieux en termes de réduction de la consommation d'énergie et lequel améliorée l'efficacité énergétique.

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

Le premier chapitre est consacré à la présentation réseaux capteurs sans fils en général, nous vais présenter le capteur et leur architecture matérielle, définition d'un réseau de capteurs sans fil et leur architecture de communication, la communication, les types, caractéristiques, les facteurs de conception dans RCSF et enfin leurs domaines d'applications.

Dans le deuxième chapitre, constitue un état de l'art des différentes solutions de minimisation de la consommation d'énergie proposées dans la littérature.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil et les différents types des protocoles de routage, nous nous intéressons en particulièrement au protocole PEGASIS ainsi que ses différentes variantes.

Le quatrième chapitre, est consacré pour la description de l'algorithme GRASP et aux travaux liées utilisant cet algorithme dans le routage pour les RCSFs.

Le chapitre cinq, présente l'implémentation du notre contribution proposée IEE-GRASP et les résultats de simulation sont détaillés.

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale et des points de vue que nous souhaitons aboutir prochainement.

CHAPITRE 1

Généralités sur les réseaux capteurs sans fil

Sommaire :

1.1 Introduction

1.2 Capteur

1.3 Capteur sans fil

1.4 Architecture d'un capteur

1.5 Réseaux de capteurs sans fil

1.6 Facteurs de conception des réseaux de capteurs

1.7 Classification des RCSF

1.8 Topologie des RCSF

1.9 Perspective de recherche et challenges dans les RCSF

1.10 Domaines D'application des RCSF

1.11 Limites des RCSF

1.12 Conclusion

1.1 Introduction

L'évolution technologique des dernières décennies a permis une parfaite coexistence des produits informatiques et électroniques. A travers des réseaux sans fil et de capteurs de plus en plus miniaturisés, cette coexistence a conduit à des développements fulgurants dans les technologies de la communication. Cette nouvelle technologie repose sur la collecte et la transmission d'informations, c'est ainsi que l'on voit l'émergence des capteurs sans fil. En effet, les exigences économiques et stratégiques constantes ont conduit au développement de contrôles environnementaux, médicaux et autres, ce qui a permis à RCSF de connaître une croissance significative.

Ce chapitre décrit quelques informations générales sur les réseaux de capteurs sans fil.

1.2 Capteur

1.2.1 Définition

Un capteur est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, vitesse, etc.) et transformer a en une valeur électrique puis de la communiquer arrivez au centre de contrôle par la station de base. [1]

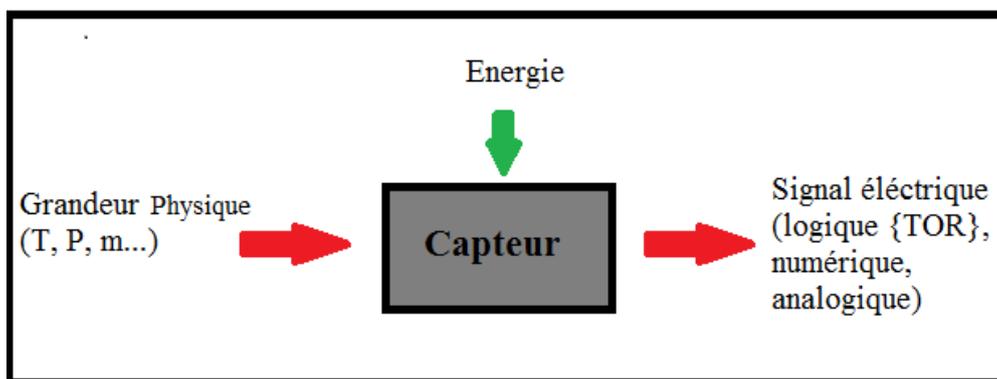


Figure 1.1 : Schéma représentatif du mécanisme de traduction d'un capteur

1.2.2 Types de capteur

On distingue deux types de classement:

1.2.2.1 Selon la sortie de signal

- a) *Capteurs TOR (tout ou rien)*: Ils portent le nom de détecteurs. Type de signal de sortie 0 ou 1.
- b) *Capteurs analogique* : Dans la pratique industrielle, on donne à ce type de matériel le nom de capteurs. Type de signal de sortie : 0 – 10V ou 4 – 20mA
- c) *Capteurs numériques* : Souvent nommés codeurs ou compteurs. Type de signal de sortie: 0011 ou 0001

1.2.2.2 Selon l'alimentation en énergie électrique

a) *Capteurs actifs* : ils utilisent une partie de l'énergie fournie par la grandeur physique à mesurer.

b) *Capteurs passifs* : ils nécessitent une alimentation en énergie électrique.

1.3 Capteur sans fil

1.3.1 Définition

Un capteur sans fil est un objet de taille réduite avec des ressources très limitées, qui sont autonomes, à trois fonctions de base qui sont : collecte , traiter les informations de l'environnement qui les entoure (température, vitesse, pression, etc.) et de les transmettre à d'autres dispositifs grâce aux ondes radios sur une distance limitée [1] .

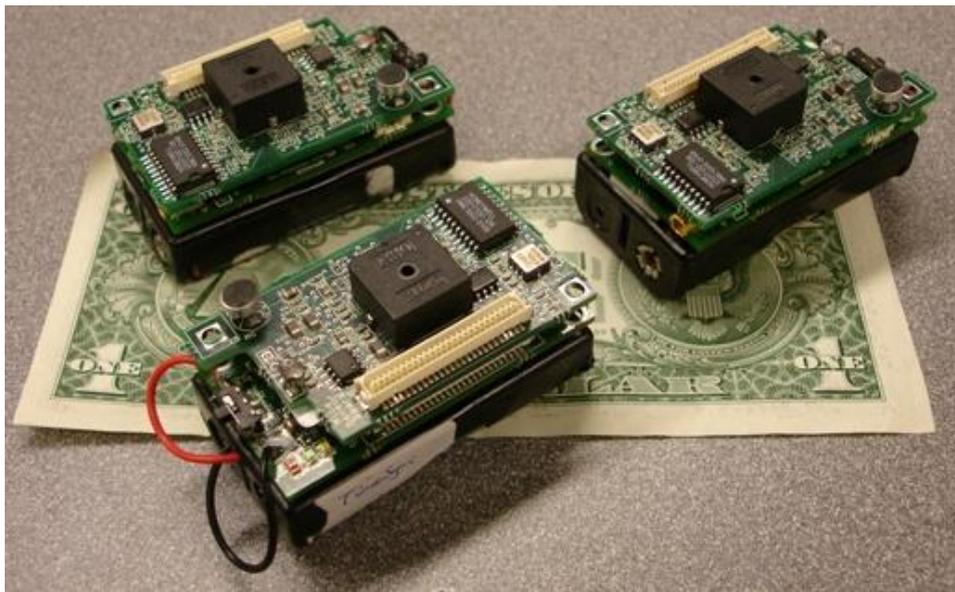


Figure 1.2: Exemple d'un Capteur .

1.3.2 Types de capteur sans fil

Actuellement il existe différents types de capteurs circulant dans le marché, comportant des caractéristiques et des fonctionnalités diverses et variées. Sachant que la plus grande majorité des capteurs sont conçus selon l'application pour laquelle ils sont utilisés cela nous donne une grande variété de capteurs. La figure ci-dessous illustre la diversité des domaines des capteurs.



Figure 1.3: Schéma représentant quelques types de capteurs.

Les capteurs ont répaté une formation fulgurante au développement convenable climat il aurore pittoresque avec apercevoir cette modification intégral au grêle parmi ces vingt dernières années. Nous constatons qu’une entreprise est privilégiée et se distingue des autres c’est Xbow aussi appelé Crossbow. En tant qu’entreprise leader dans le domaine de la fabrication de capteurs, cette dernière est issue de la célèbre Université de Californie et possède l’Université de Berkeley, qui a enregistré certains des travaux de recherche les plus importants au monde.

Les capteurs fabriqués par Xbow depuis une dizaine d’années (capteurs des séries Mica et Telos, etc.) sont sans doute les plus utilisés dans les expérimentations et les travaux de recherche. Ces capteurs sont capables de mesurer plusieurs métriques (température, humidité, etc.,...) et s’articulent pour la plus part d’entre eux autour de Chipcon CC2420 qui est devenu le standard au niveau des modules de transmission utilisant le protocole de communication IEEE 802.15.4 [2].

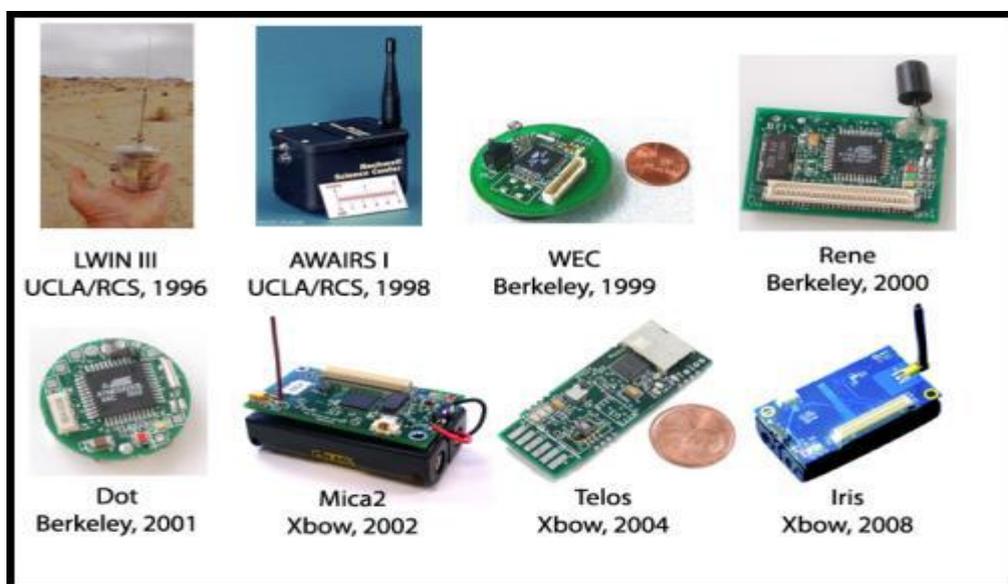


Figure 1.4: Evolution des capteurs [2].

1.4 Architecture d'un capteur

Concernant l'architecture du capteur, elle peut être divisée en deux parties : l'architecture matérielle et l'architecture logicielle sont complémentaires, car elles forment l'ensemble du capteur.

1.4.1 Architecture matérielle

Le capteur se compose de quatre unités de base, comme le montre la figure ci-dessous:

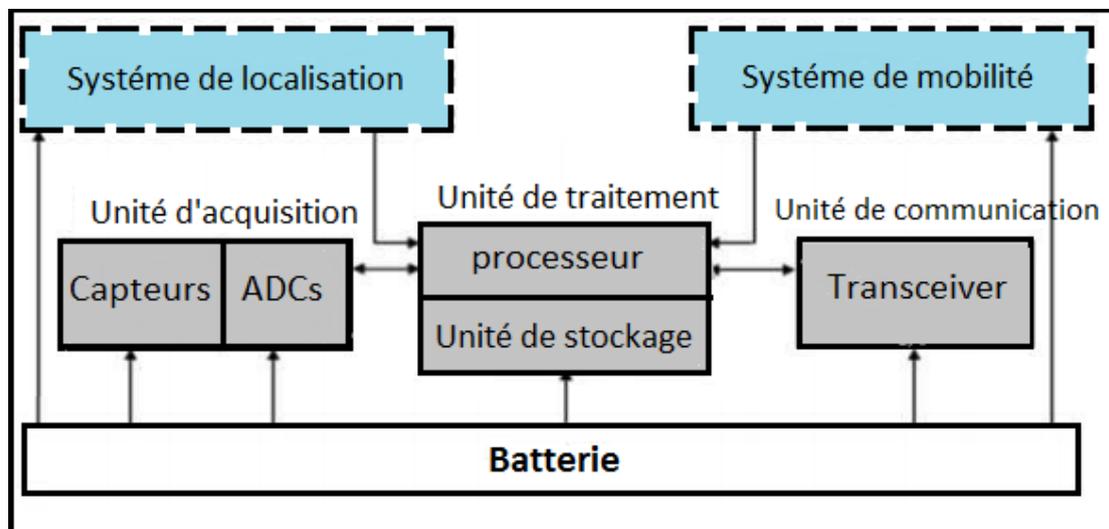


Figure 1.5: Architecture matérielle d'un capteur sans fil.

a) *Unité de captage :*

C'est l'unité qui est chargée de capter des grandeurs physiques (chaleur, humidité, vibrations, rayonnement, etc.) et de les transformer en grandeurs numériques (un signal électrique). Cette unité peut incorporer de un jusqu'à plusieurs capteurs plus une unité ADC (Analog to Digital Converters). Le rôle de cette dernière consiste à convertir les signaux analogiques en signaux numériques.

b) *L'unité de traitement :*

Se compose de deux interfaces une avec l'unité d'acquisition et l'autre avec l'unité de communication, son rôle est le contrôle du bon fonctionnement des autres unités.

Cette unité permet l'exécution de procédures de communication qui permettent la collaboration d'un nœud avec les autres nœuds du réseau ; elle permet aussi l'analyse des données récoltées afin d'alléger le travail du nœud puits.

c) *L'unité de communication :*

L'unité peut effectuer toutes les communications entre différents nœuds sur un support sans fil car elle est équipée d'un émetteur/récepteur.

d) Batterie :

Elle alimente les appareils mentionnés ci-dessus et n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteur représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position System) [3].

1.4.2 Architecture Logicielle

La contrainte énergétique des capteurs exige l'utilisation de systèmes d'exploitation légers tels que TinyOS [4] ou Contiki [5]. Cependant, TinyOS reste toujours le plus utilisé et le plus populaire dans le domaine des RCSF. Il est gratuit et est utilisé par une grande communauté de scientifiques de la simulation pour développer et tester des algorithmes et des protocoles de réseau.

a) TinyOS :

TinyOS est un système d'exploitation open source qui a trouvé ses racines dans le laboratoire informatique de l'Université de Berkeley et est l'un des systèmes opérationnels conçus pour les réseaux de capteurs miniatures. En fait, TinyOS est le système d'exploitation le plus utilisé pour les réseaux de capteurs sans fil. Il est capable d'intégrer très rapidement les innovations en relation avec l'avancement des applications et des réseaux eux-mêmes tout en minimisant la taille du code source en raison de problème inhérent de mémoire au les réseaux de capteurs.

Un autre but de TinyOS est de prolonger la durée de vie du capteur. Dans cette optique, la programmation sous TinyOS est une programmation événementielle, c'est-à-dire que l'exécution des différentes instructions s'effectue en fonction des événements enregistrés par l'unité de traitement. Ce type de programmation est adapté aux capteurs car il n'y a pas de traitement que lors d'apparitions d'événements, ce qui permet au capteur de rester dans un état de veille le reste du temps afin de préserver son énergie.

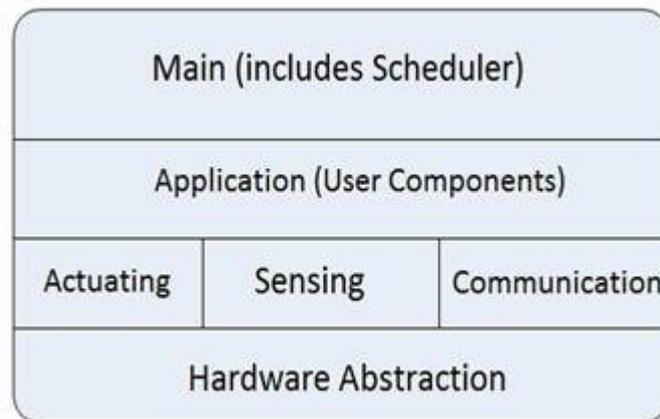


Figure 1.6: Structure TinyOS [6].

b) Contiki :

Contiki est également un système d'exploitation OS. C'est un système configurable modulaire pour les réseaux de capteurs. C'est un système modulaire et configurable pour les réseaux de capteurs. Contiki est un système d'exploitation conçu pour occuper le moins d'espace possible avec très peu de mémoire .

Le système utilisant Contiki contient des processus, qui peuvent être des applications ou des services, c'est-à-dire des processus qui fournissent des fonctions pour une ou plusieurs applications. La communication entre processus se fait par l'envoi d'événements. Le noyau Contiki reste, nativement est un système d'exploitation basé sur les événements.

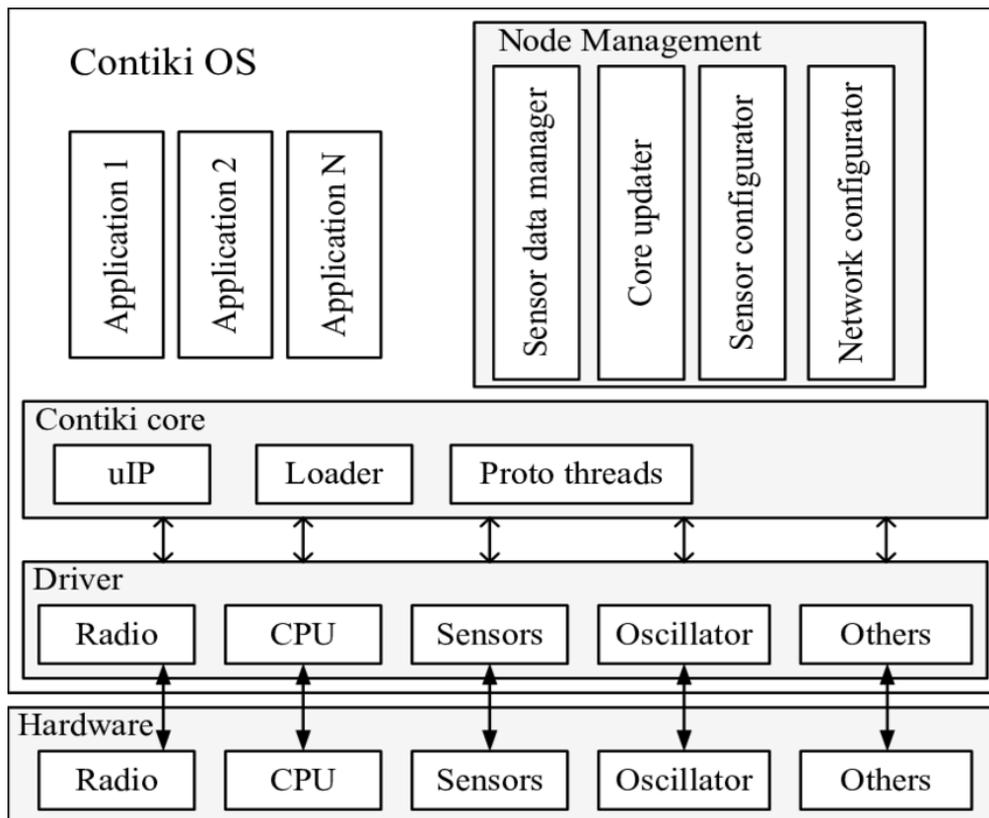


Figure 1.7: Structure Contiki [3].

1.5 Réseaux de capteurs sans fil

1.5.1 Aperçu historique sur la recherche sur les RCSF

La technologie des RCSF a connu un progrès fulgurant grâce aux avancées technologiques dans le domaine des MEMS (Micro Electro-Mechanical System), des circuits intégrés et des technologies de communication sans fil. Le RCSF peut s'intégrer à un spectre d'applications très large qui touche quasiment tous les domaines de la vie. Comme la plupart des technologies avancées, les réseaux de capteurs sans fil ont vu le jour dans le domaine militaire et les applications industrielles importantes (p. ex. les réseaux de distribution électriques, le traitement des eaux usées et l'automatisation des usines « specialized factory automation »).

Le système de surveillance du son SOSUS peut être considéré comme le premier réseau de capteurs présentant des similitudes avec les réseaux de capteurs sans fil modernes. Ce projet a été développé par l'armée américaine dans les années 1950 dans le but de détecter et de suivre l'Union soviétique utilisant des capteurs acoustiques sous-marins [7].

Cependant, le développement des capteurs sans fil distribués n'a commencé qu'en 1980 avec le programme DSN "Distributed Sensor Network" initié par la DARPA [8].

Puis, avec la participation de grandes universités américaines (telles que Berkeley et MIT), cette technologie a trouvé une place dans la recherche académique et civile, ce qui a donné naissance à de nouvelles applications civiles .

Grâce à l'évolution extrêmement rapide dans ce domaine et l'énorme champ d'applications potentielles de cette technologie, les industriels n'ont pas tardé à rejoindre cette communauté, ce qui a donné une poussée vers l'avant en accélérant la production des dispositifs de nœuds RCSF tout en réduisant leur coût .

Des applications identiques au système SOSUS que nous avons mentionné au début de cet aperçu existent toujours, mais pour des raisons plutôt pacifiques [9], comme la supervision de la vie sous-marine et des activités volcaniques, ce qui reflète l'évolution non seulement sur le plan technologique, mais aussi au niveau des types d'applications ciblées par les RCSF.

Ces applications s'inscrivent actuellement en majeure partie dans la catégorie des applications scientifiques et civiles .

1.5.2 Définition

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) se compose d'un grand nombre de nœuds, appelés capteurs. Ces capteurs sont de petits appareils électroniques, qui peuvent être de simples capteurs, ou de petits ordinateurs capables de capturer, modifier et stocker des informations et de transmettre les informations par radio à des stations de base ou à d'autres capteurs, de sorte que les informations sont concentrées dans une station appelée "station de base ou Sink " [10,11,12].

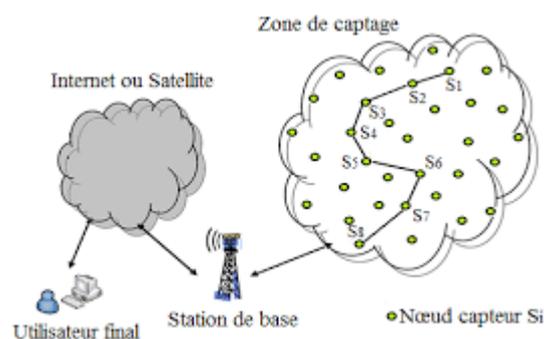


Figure 1.8: Réseaux de capteur sans fil.

1.5.3 Architecture d'un RCSF

Le réseau de capteurs sans fil est principalement composé de plusieurs nœuds capteurs, nœuds Sink et un centre de traitement des données.

a) *Nœuds* : ce sont des capteurs qui répondent aux exigences de l'application ils sont conçus du point de vue de leur architecture, et leur répartition géographique.

b) *Sink ou puits* : il s'agit d'un nœud important du réseau. Son rôle est différent des autres nœuds du réseau, car sa tâche est de collecter des données depuis d'autres nœuds du réseau, c'est pourquoi il doit toujours être actif, car la réception des données se fait de manière aléatoire, et pour son énergie doit être illimitée.

c) *Centre de traitement des données* : toutes les données collectées par Sink sera envoyée là-bas et le centre collectera toutes les informations et les triera Pour identifier ceux qui sont disponibles.

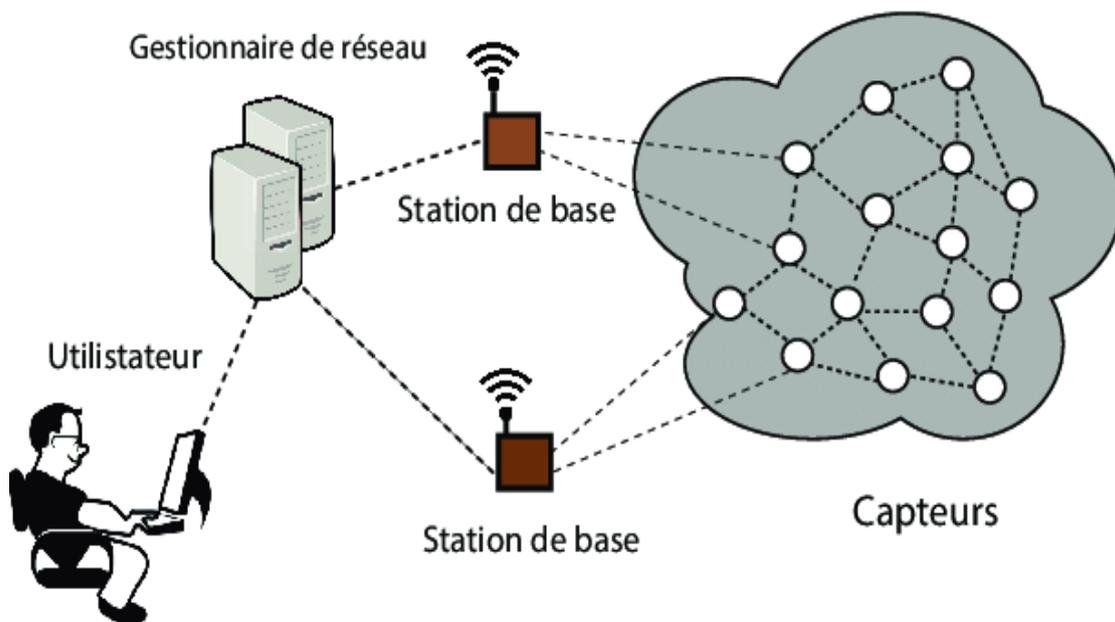


Figure 1.9: Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fil.

1.5.4 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil présentent des caractéristiques particulières par rapport aux réseaux sans fil. Parmi les principales caractéristiques nous décrivons [13]:

a) *Absence d'infrastructure:*

Les réseaux de capteurs en général, se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée à l'exception des réseaux ad hoc.

b) *Scalabilité:*

Les réseaux de capteurs peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Un si grand nombre générera un grand nombre de transmissions inter-nœuds, et le nœud "Sink" doit être équipé d'une grande mémoire pour stocker l'entraînement reçu.

c) Topologie dynamique :

Les capteurs peuvent être connectés à des objets en mouvement qui se déplacent librement et arbitrairement, de sorte que la topologie du réseau change fréquemment. Ce type de scène génère des topologies dites dynamiques.

d) Sécurité physique limitée :

Les réseaux de capteurs sans fil mobiles sont plus affectés par les paramètres de sécurité que les réseaux câblés traditionnels. Ceci est justifié par des contraintes et restrictions physiques, ce qui signifie que le contrôle des données transmises doit être minimisé.

e) Auto-organisation du réseau :

Le réseau de capteurs comporte un grand nombre de nœuds, qui sont principalement placés dans des endroits hostiles où la configuration manuelle n'est pas réalisable, ce qui nécessite une configuration automatique. Par conséquent, le réseau doit pouvoir se reconfigurer pour continuer sa fonction en cas d'insertion ou de suppression d'un nœud.

f) Durée de vie limitée :

Le principal facteur limitant la durée de vie des réseaux de capteurs est l'énergie. Dans de nombreuses applications, les nœuds capteurs sont placés dans des zones hostiles difficiles voire impossibles pour l'homme. Par conséquent, charger et remplacer les batteries est devenu une tâche difficile. La durée de vie du capteur dépend en grande partie de la durée de vie de sa batterie.

g) Ressources limitées :

Généralement, la taille des nœuds de capteurs est très petite et cette forme limite la quantité de ressources pouvant être placées dans ces nœuds. Par conséquent, la capacité de traitement et de stockage est très limitée.

h) Tolérance aux fautes :

La tolérance aux pannes est la capacité à maintenir la fonctionnalité du réseau en cas de panne. La fiabilité des réseaux de capteurs sans fil est affectée par des pannes qui surviennent pour diverses raisons telles que des pannes d'équipement ou une alimentation insuffisante. Ces problèmes n'affecteront pas le reste du réseau

i) Densité de nœuds « élevée » :

Les réseaux de capteurs sont généralement constitués d'un très grand nombre de nœuds pour assurer une couverture complète de la zone surveillée. Cela conduit à un niveau élevé de surveillance et garantit une transmission plus fiable des données dans les conditions du champ de capteur.

1.5.5 Architecture protocolaire

Les réseaux de capteurs sans fil utilisent une architecture de communication en couche qui comprend cinq couches du model OSI (Open Systems Interconnexion) composé d'une couche application, une couche transport, une couche réseaux, une couche liaison de données, une couche physique et chaque couche a son rôle, ainsi que trois niveaux qui sont : (un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité, un plan de gestions des tâches) [14] .

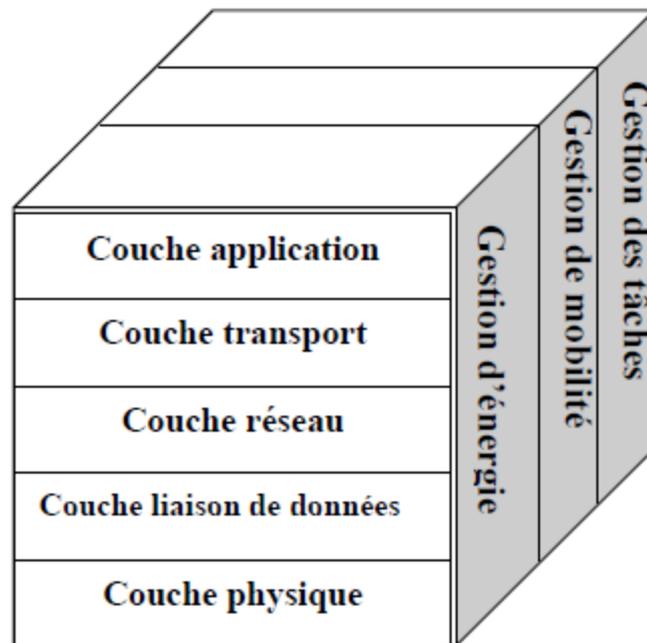


Figure 1.10: Architecture protocolaire.

1.5.5.1 Couche physique

Responsable de la sélection de la fréquence, de la détection du signal et de la modulation.

1.5.5.2 Couche liaison de données

Généralement cette couche est responsable de Multiplexage, détection et verrouillage de flux de données contrôle d'accès aux données et aux médias MAC, et la plupart Enfin, une tentative a été faite pour éliminer complètement le conflit.

1.5.5.3 Couche réseau

La fonction principale de cette couche est de trouver le routage et via le réseau au niveau du nœud de capteur source et destination.

1.5.5.4 Couche de transport

Cette couche est responsable de la transmission des données, du traitement de la segmentation des paquets de données et du contrôle de flux.

1.5.5.5 Couche application

Selon les différentes tâches de capture, il existe différents types. Logiciel pouvant être installé et utilisé dans la couche application.

1.5.5.6 Plan de gestion de l'énergie

Les ressources énergétiques des nœuds capteurs sont fortement limitées, ce qui affecte directement la durée de vie du réseau.

Par conséquent, le plan de gestion de l'énergie doit fournir un mécanisme de gestion efficace pour réduire l'ampleur de la consommation d'énergie et éliminer les sources de gaspillage d'énergie.

1.5.5.7 Plan de gestion de la mobilité

Un système mobile doit exister, car les nœuds de capteurs sans fil peuvent être mobiles et doivent détecter et enregistrer le mouvement (mobilité) de tous les nœuds.

1.5.5.8 Plan de gestion des tâches

Dans un réseau de capteurs, les nœuds peuvent effectuer différentes tâches en termes de consommation de ressources. Par conséquent, afin de répartir équitablement les tâches entre les nœuds de capteurs, permettant ainsi une gestion efficace des ressources disponibles, un plan de gestion des tâches est généralement requis.

1.6 Facteurs de conception des réseaux de capteurs

Les paramètres que je mentionnerai jouent un rôle important dans la conception et la mise en œuvre des réseaux de capteurs sans fil. Ces paramètres incluent l'adaptabilité, la topologie du réseau, le support de transmission et la consommation d'énergie.

1.6.1 Adaptabilité

Dans les réseaux de capteurs, l'adaptation est très importante pour contrôler les capteurs lors de changements environnementaux. [15]

1.6.2 Topologie de réseau

Le réseau peut être instable en raison de divers facteurs, notamment l'ajout de nouveaux capteurs à la zone de chalandise ou la perte de plusieurs nœuds de capteurs. [16]

1.6.3 Média de transmission

La liaison du nœud de communication peut être réalisée par voie radio, signal, infrarouge ou optique. [17]

1.6.4 Consommation d'énergie

Les nœuds capteurs ne peuvent être alimentés que par une alimentation électrique limitée, Parce qu'il s'agit de petits composants électroniques, cela dépend de la durée de vie du nœud

de capteur et de la durée de vie de la batterie associée chaque nœud utilise le réseau de capteurs pour une communication multi-sauts et agit en même temps comme initiateur de données et routeur, ce qui entraîne la consommation d'énergie du réseau de capteurs.

Afin de consommer le moins d'énergie possible, la plupart des recherches se concentrent désormais sur la conception d'algorithmes et de protocoles pour ce type de réseau. [18]

1.7 Classification des RCSF

En fonction des exigences imposées par chaque type d'application, il existe plusieurs critères pour classer les réseaux de capteurs. En effet, pour chaque type d'application, ces réseaux ont des caractéristiques différentes [19]

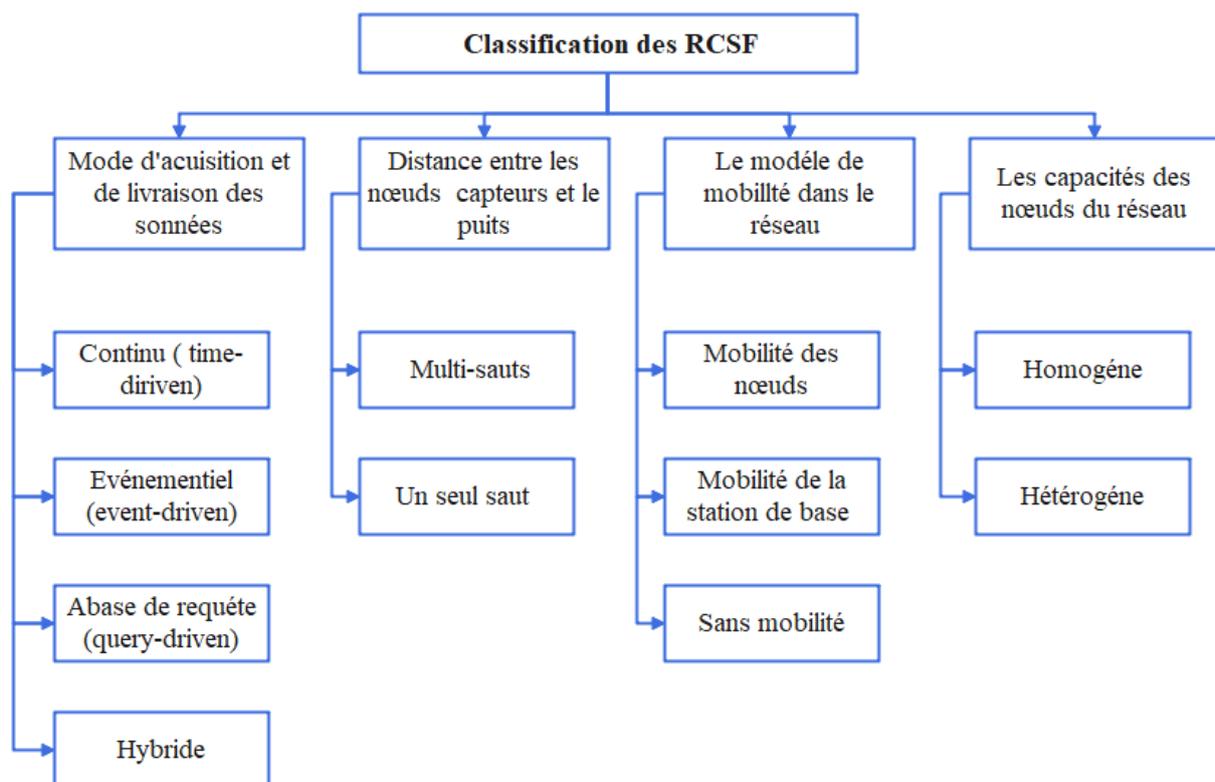


Figure 1.11: Classification des RCSFs.

a) Selon le mode d'acquisition et de livraison des données au puits :

Le modèle d'acquisition et de livraison des données au puits (Sink) dépend de l'application et de ses exigences pour ce type de réseaux. Il peut être

- ❖ Continu (time-driven): les nœuds doivent périodiquement réveiller leurs émetteurs pour envoyer les données captées au puits.
- ❖ Événementiel (event-driven): les capteurs envoient leurs mesures seulement lorsqu'il y a un événement qui se produit.

- ❖ A base de requête (query-driven): 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.
- ❖ Hybride: est une combinaison des trois modèles précédents.

b) Selon la distance entre les nœuds capteurs et le puits :

Dans ce cas, il existe une différence entre un réseau à saut unique (WSN single-hop) et un réseau multi- sauts (WSN multi-hop).

❖ **Réseaux à un seul saut (Single-hop WSN)**

Dans un réseau de capteurs à saut unique, les nœuds de capteurs communiquent directement avec le puits. Ensuite, ils envoient les données capturées directement au puits sans passer par d'autres nœuds intermédiaires.

❖ **Réseaux à multi-sauts (multi-hop WSN)**

Si la distance entre quelques nœuds capteurs et le puits dépasse sa portée maximale r , ces nœuds doivent utiliser d'autres nœuds intermédiaires pour envoyer leurs données au puits. Dans ce cas, nous disons que nous avons un réseau multi-sauts. Ce type de réseau a un large éventail d'applications, mais il est difficile à mettre en œuvre.

c) Selon le modèle de mobilité dans le réseau :

L'intérêt de la mobilité dans les RCSF est multiple dans la mesure où les capteurs mobiles peuvent permettre d'étendre la couverture d'un réseau ou encore obtenir des résultats plus précis. La classification selon le modèle de mobilité 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. On peut par exemple avoir un réseau constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles et d'un puits fixe. Le but de tels réseaux est la plupart du temps l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses.

d) Selon les capacités des nœuds du réseau :

Dans cette classification, une distinction est faite entre les réseaux homogènes et les réseaux hétérogènes. Dans un réseau de capteurs homogène, tous les nœuds du réseau sont les mêmes en termes d'énergie et de complexité matérielle. De toute évidence, le nœud leader du cluster est chargé de tâches supplémentaires nécessaires, telles que l'agrégation de données et la coordination du protocole de routage, de sorte que leur cycle de vie est antérieur à celui des autres nœuds. Pour cette raison, les nœuds alternent périodiquement le rôle de chef de cluster entre eux.

Dans le cas des réseaux de capteurs hétérogènes, certains nœuds complexes ont plus de capacités de traitement et de communication que les nœuds ordinaires. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la durée de vie du réseau.

1.8 Topologie des RCSF [20]

a) *Topologie en étoile :*

La topologie en étoile est une topologie simple, caractérisée par une faible consommation d'énergie. Cette topologie est basée sur un système à saut unique, c'est-à-dire que tous les nœuds envoient et reçoivent uniquement des données avec la station de base. La station est vulnérable aux attaques. Dans cette topologie, entre les nœuds La distance et la station est limitée.

b) *Topologie en toile (en grille) :*

Contrairement à la topologie en étoile, la topologie de canevas est un système à plusieurs sauts. La communication entre les nœuds et les stations de base est possible. Chaque nœud a plusieurs chemins pour envoyer des données. Cette topologie a plus de possibilités d'extension au réseau, avec redondance et tolérance aux pannes, mais elle nécessite plus de consommation d'énergie.

c) *Topologie hybride :*

La topologie hybride est un mélange des deux premières topologies. La station de base forme une topologie de canevas et les nœuds environnants sont dans une topologie en étoile. Il garantit que l'énergie dans le réseau de capteurs est minimisée.

d) *Topologie plate :*

Le protocole de topologie plate considère que tous les nœuds sont égaux, ont les mêmes fonctions et peuvent communiquer entre eux sans passer par un nœud ou une passerelle spécifique. Un seul nœud spécifique, le récepteur, est chargé de collecter les données des différents nœuds capteurs afin de les transmettre au centre de traitement. [21]

1.9 Perspective de recherche et challenges dans les RCSF

Le grand nombre d'applications et de communications suggère que ce domaine de recherche est résolu à l'avance, la réalité est différente ; en effet, les problèmes et contraintes dans ce domaine sont loin d'être résolus. Il n'y a pas de norme qui régit les RCSF, les problèmes de communications, de traitement des données et de gestion du capteur lui-même sont partiellement identifiés. La plupart des challenge techniques issuee par la groupe des chercheurs se résument à des problèmes : découverte de réseau, routage et contrôle de réseau, traitement de l'information et collecte et diffusion de données.

a) Découverte du réseau:

Connaître le réseau est vital pour le bon fonctionnement du capteur. Chaque nœud du réseau doit connaître l'identité et la position de ces voisins pour construction un traitement collaboratif, et ce problème est résolu à l'aide du GPS ; Mais ce système peut devenir obsolète ou très coûteux, des algorithmes de positionnement relatif appropriés doivent donc être suggérés.

b) Contrôle et routage du réseau :

Pour survivre le plus longtemps possible, le réseau doit trouver un compromis entre une puissance limitée, une bande passante étroite et partagée et une consommation de traitement accrue. Les communications ne sont plus planifiées, elles doivent être créées au besoin à l'aide d'algorithmes. De plus, la transmission par radiofréquence (RF) est limitée par la distance entre les nœuds, notamment pour les réseaux terrestres, ce qui complique la gestion de l'alimentation. Les protocoles produits doivent être configurés lors de la conception car aucune interférence n'est possible après le déploiement du réseau.

Par conséquent, le protocole proposé devrait déployer un nombre approprié de nœuds pour fournir simultanément plusieurs chemins et choisir le chemin qui optimise la consommation d'énergie. L'aspect le plus important de la conception est de connaître exactement l'effet de la taille du réseau et de la densité de couverture des nœuds sur la latence, la connectivité et la consommation d'énergie.

c) Traitement collaboratif des informations :

Les nœuds de réseau dédiés travaillent ensemble pour collecter et traiter les informations afin de fournir un résultat intéressant. Le traitement collaboratif de l'information est une nouvelle direction de recherche basée sur la fusion de données distribuées. Un aspect important de cette tendance est le niveau de participation autorisé et la manière dont les données provenant de plusieurs sources sont combinées ; Un résultat satisfaisant demande beaucoup de communication (et donc d'énergie).

Dans un WSN, les informations peuvent atteindre un nœud via plusieurs chemins. L'algorithme de fusion doit spécifier la dépendance des informations à combiner et éviter le double calcul. La conservation de gros volumes de données est une approche utilisée dans les réseaux avec des nœuds grands et puissants, mais cette approche peut ne pas être pratique pour les réseaux de capteurs avec des ressources de traitement et de transmission limitées. Un autre aspect est de respecter le temps d'attente admissible et la connexion requise tout en augmentant la durée de vie opérationnelle du réseau.

Le WSN devrait permettre l'échantillonnage spatial sans l'utilisation d'algorithmes complexes. Ces algorithmes doivent être asynchrones, car les vitesses des processeurs et les capacités de transmission peuvent varier voire disparaître et réapparaître. Les nœuds doivent présenter les résultats avec une précision croissante, ainsi, les opérations peuvent être terminées lorsque la précision souhaitée est atteinte.

d) Collecte et l'interrogation des données:

Dans un WSN, les données sont réparties sur des nœuds géographiquement dispersés et connectés par des liens incertains ; Cela rend la base de données plus vulnérable, en particulier pour les applications militaires qui nécessitent une faible latence, des données en temps réel et une communication continue sur le champ de bataille. Il est important que les utilisateurs disposent d'une interface simple en mode interactif pour interroger le réseau. Les utilisateurs doivent pouvoir contrôler l'accès aux informations, tout en cachant les détails du sujet à divers capteurs. L'un des défis est de développer un langage de requête puissant tel que le langage de requête pour les bases de données.

D'autres défis incluent des mécanismes distribués et efficaces pour interroger et exécuter des tâches, ainsi que pour organiser et mettre en cache les données. La plate-forme mobile doit prendre en charge les demandes d'un nœud mobile ; L'exemple réel est que si un aéronef lance une requête vers un capteur stationnaire, le système doit permettre au capteur interrogé de transmettre des données où se situera l'aéronef au moment de la réponse.

e) Sécurité:

Étant donné que les réseaux sans fil peuvent fonctionner dans un environnement hostile, la sécurité doit être prise en compte lors de la conception, et non après le déploiement. Des technologies sont nécessaires pour fournir la latence la plus faible possible, une longue durée de vie du réseau et une sécurité sans faille. La possibilité de détection des transmissions devrait être réduite car des capteurs sont déployés derrière les lignes ennemies. Pour la même raison, le réseau doit être protégé des attaques de toute nature.

1.10 Domaines d'application des RCSF

Les RCSFs est une nouvelle technologie, actuellement largement utilisée Dans plusieurs domaines différents; ils sont utilisés dans l'armée, la sécurité Civil, médical, transport, environnement,...etc.

a) Domaine militaire : détection et collecte d'informations sur la position et le mouvement de l'ennemi.

b) *Domaine médical* : suivi à distance des patients (fréquence cardiaque, pression acoustique, etc.), localisation des patients et des médecins à l'hôpital, etc.

c) *Champ de trafic* : contrôle du trafic, capture de la pression des pneus, Prévention des accidents... etc.

d) *Domaine civil* : Apparaît dans une variété d'environnements, en particulier dans la surveillance des maisons (concept de bâtiment intelligent), des infrastructures, des installations et des zones à risque. Leur utilisation peut réduire considérablement le budget de la sécurité humaine tout en garantissant des résultats sûrs et fiables.



Figure 1.12: Quelques domaines d'application des RCSF.

1.11 Limites des RCSF

En raison du manque d'équipements de positionnement automatique, le positionnement dans les réseaux de capteurs présente certaines limites. Il existe de nombreuses contraintes de conception, et nous citerons les principales contraintes répétées par la théorie principale :

- ❖ Assurez-vous que le réseau est continu et sans problème.
- ❖ Une mémoire qui peut stocker toutes les informations reçues.
- ❖ Contrôler les coûts de production.
- ❖ Surmonter les défaillances environnementales.
- ❖ En raison d'une maintenance assidue, déploiement de la topologie.
- ❖ Identifier les facteurs matériels, tels que la taille du capteur, le gain d'énergie, l'adaptabilité à l'environnement et sa résistance.

- ❖ Mettre en œuvre des normes de transmission, telles que la communication radio infrarouge, Bluetooth et ZigBee.
- ❖ La suffisance entre usage et consommation d'énergie peut assurer la pérennité du réseau.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une généralité sur les RCSFs. En exposant la définition d'un capteur , son architecture, ses types, ...etc. Ensuite nous avons présenté un aperçu général sur les RCSFs.

CHAPITRE 2

Economie d'énergie dans les RCSFs

Sommaire :

2.1 Introduction

2.2 Notions

2.3 Où gaspiller l'énergie?

2.4 Facteur de sur consommation d'énergie

2.5 Techniques de conservation d'énergie

2.6 Conclusion

2.1 Introduction

Dans un réseau de capteurs, l'énergie est la ressource la plus précieuse qui a un impact direct sur la durée de vie des capteurs et de l'ensemble du réseau. Cela est dû aux limitations de puissance des batteries qui alimentent les capteurs d'une part et à la forte possibilité que ces batteries ne soient pas remplacées d'autre part. La durée de vie du réseau est maximisée pour réduire la consommation électrique des nœuds. Malgré la variété des protocoles et la faible consommation d'énergie qui a été proposée, la puissance dans un réseau de capteurs reste un problème de recherche ouvert, qui nécessite d'autres solutions qui enrichissent et améliorent les solutions existantes.

Dans ce chapitre nous présentons l'économie d'énergie dans les RCSFs. Nous commençons par une définition de la durée de vie d'un réseau. Ensuite, nous présentons les ressources de gaspillage d'énergie, Puis, les facteurs intervenants dans la consommation d'énergie et enfin les technique de conservation d'énergie.

2.2 Notions

a) *Duré de vie :*

Dans les réseaux de capteurs, l'efficacité énergétique est une mesure de performance importante, qui affecte directement la durée de vie de l'ensemble du réseau [22, 23, 24]. Selon la discussion d'Akyildiz et al. [1], la quantité prédominante d'énergie consommée par un nœud capteur dépend principalement de l'énergie qu'il consomme sur une période de temps donnée et de la quantité d'énergie dont il dispose. La durée de vie d'un réseau de capteurs est la période de temps pendant laquelle le réseau peut maintenir une connectivité suffisante ou maintenir le taux de perte d'informations en dessous d'un certain seuil. L'épuisement d'un certain pourcentage de nœuds entraînera l'absence de couverture de zone et/ou de partitionnement du réseau.

L'épuisement d'un certain pourcentage de nœuds entraînera l'absence de couverture de zone et/ou de partitionnement du réseau. Les définitions possibles de la durée de vie suggérées dans la littérature sont les suivantes :

- ❖ Le temps jusqu'à ce que le premier nœud ait épuisé toute son énergie [25, 26, 27, 28, 29].
- ❖ Le temps jusqu'à ce qu'il y ait un certain pourcentage des nœuds restants au maximum dans Grille [30, 31, 32].
- ❖ Le temps mis par tous les nœuds capteurs pour consommer leur énergie [33].

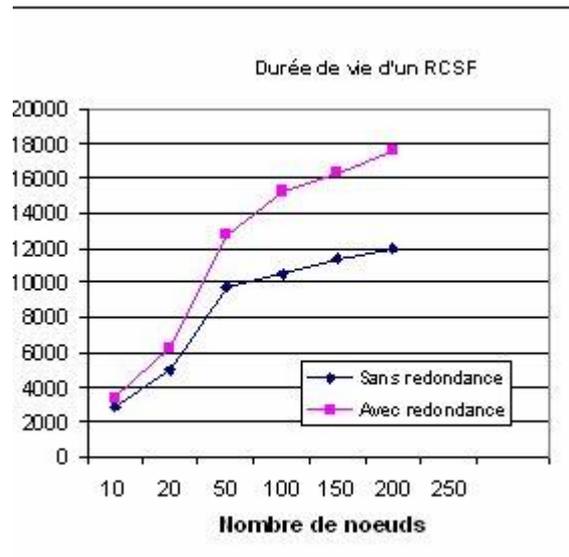


Figure 2.1 : représentation de la variation de la durée de vie dans les RCSF.

b) Couverture :

La couverture de zone signifie que nous voulons déployer un réseau de capteurs pour couvrir tous les points de la zone d'intérêt à couvrir. Cela signifie que si nous prenons un point quelconque dans le champ d'intérêt, il doit être couvert par au moins un nœud capteur. Ce type de couverture est généralement utilisé pour la majorité des applications, telles que la surveillance des forêts pour les incendies potentiels et la surveillance des champs de bataille. Pour déterminer la couverture de zone, les nœuds doivent être déployés de manière aléatoire ou déterministe, et pour cela, il faut répondre à la question suivante : quel est le nombre minimum de capteurs à utiliser tout en assurant un taux de couverture maximum [34] sans oublier que des nœuds sont utilisés stations proches Le cœur transmet plus de données que les autres nœuds qui sont relativement éloignés, donc plus de nœuds doivent être déployés dans les zones proches des stations de base.

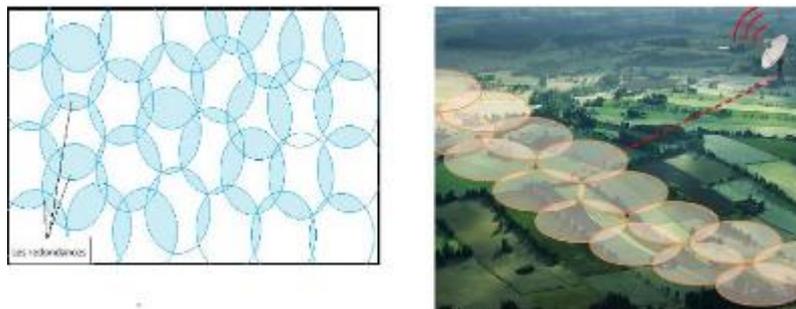


Figure 2.2 : Schéma représentatif de la couverture de zone dans les RCSF.

c) Connectivité :

Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement si il existe au moins un chemin entre chaque paire de nœuds [35], dire que deux nœuds RCSF sont connectés si et seulement s'ils

peuvent communiquer directement (connexion à saut unique) ou indirectement (connexion à sauts multiples).

La connectivité dépend principalement de la présence de routes. Il est affecté par les changements de structure dus à la mobilité, aux défaillances de nœuds, aux attaques, etc.

Cela se traduit par : la perte des liens de communication, l'isolement des nœuds, la fragmentation du réseau, etc. La compréhension de la connectivité réseau permet d'adapter les mécanismes de communication pour assurer le bon fonctionnement des applications.

Ainsi, la détection de voisinage de nœud de capteur est un composant important. Dans son activité cyclique, les pertes de contact sont dues principalement à la mobilité des nœuds et aussi aux mécanismes associés aux économies d'énergie.

La forte densité de nœuds dans les réseaux de capteurs les empêche d'être complètement isolés les uns des autres. Par conséquent, il est nécessaire de connecter fermement les nœuds de capteur.

Comme la couverture, la connectivité dans RCSF est un paramètre de mesure de performance très important, et donc, afin de garantir pleinement toutes les fonctionnalités de ces applications, il est nécessaire d'étudier attentivement les caractéristiques de connectivité et de les prendre en compte lors de la conception et du déploiement de ces réseaux.

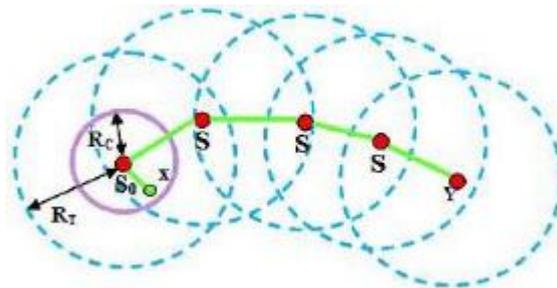


Figure 2.3 : Schéma représentatif de la connectivité dans les RCSF.

2.3 Où gaspiller l'énergie?

La puissance consommée par le nœud capteur est principalement due aux opérations suivantes: capture, traitement et transmission des données [1].

2.3.1 Energie de capture

La puissance de capture est dissipée pour accomplir les tâches suivantes : échantillonnage, traitement du signal, conversion analogique-numérique et activation de la sonde de capture. La puissance de démarrage est généralement un petit pourcentage de la puissance totale consommée par le nœud.

2.3.2 Energie de traitement

L'énergie de processus est divisée en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. La puissance de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau du programme (en exécutant le programme). D'autre part, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement.

2.3.3 Energie de communication

L'énergie de communication est divisée en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie d'émission. Cette puissance est déterminée par la quantité de données à délivrer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques de l'unité radio. L'émission du signal se distingue par sa force. Lorsque la puissance d'émission est élevée, le signal aura une large portée et la puissance consommée sera plus élevée.

2.4 Facteur de sur consommation d'énergie

La surconsommation ou l'énergie gaspillée est toute énergie consommée qui dépasse la limite normale. Cela peut être causé par divers phénomènes qui génèrent un gaspillage d'énergie des nouveaux capteurs, à savoir :

a) Ecoute passive (idle) : De nouveaux capteurs sortent périodiquement de leur état de veille pour écouter le trafic réseau, sans recevoir ni transmettre de données, ce qui permet de gaspiller inutilement des réserves d'énergie. De plus, la transition périodique entre le sommeil et l'écoute va générer une autre source de consommation d'énergie excessive qui ne peut être négligée.

b) Interférences et les collisions : En raison de la nature de l'environnement de communication sans fil. Parce que ceux-ci provoquent la retransmission de paquets lors de collisions, ce qui est très coûteux en énergie.

c) Puissance de transmission : Étant donné que la portée des antennes radio est directement liée à la puissance d'émission utilisée. La plupart des nouveaux capteurs ont des antennes à portée fixe dont la puissance d'émission est pré-réglée par les concepteurs. Par conséquent, un nouveau capteur peut gaspiller de l'énergie en utilisant beaucoup de puissance de transmission afin de communiquer avec un nœud qui lui est très proche.

d) Distances de transmission : Pour économiser la consommation d'énergie, il est préférable de réduire les distances de transmission entre les nouveaux capteurs. Ainsi, la communication à sauts multiples est souvent adoptée dans les réseaux de capteurs sans fil, contrairement aux connexions à saut unique dans lesquelles la dissipation de puissance est très élevée.

e) Ecoute abusive (Overhearing) : Le nouveau capteur est apte à recevoir toutes les données échangées entre ses nœuds adjacents, même si ces derniers ne lui sont pas destinés. L'intensité de cette écoute abusive est proportionnelle à la densité du réseau. Ainsi, cela peut entraîner un gaspillage d'énergie important, car la majorité des RCSF sont largement déployés.

f) Surcoût des paquets de contrôle (Overhead) : L'échange de paquets de contrôle peut être une autre source de gaspillage d'énergie, en particulier si le nombre de paquets de contrôle est inutilement élevé.

g) Overemitting : Le nœud capteur envoie des données à un nœud de destination qui n'est pas prêt à les recevoir. Cela peut arriver si leurs cycles de travail ne sont pas synchronisés.

2.5 Techniques de conservation d'énergie

Dans les applications RCSF typiques, les nœuds capteurs, qui sont dans la plupart des cas alimentés par des sources d'alimentation internes (batteries), sont souvent nombreux (par milliers) et sont généralement déployés dans des environnements hostiles distants. Il devient alors impossible de remplacer ou de recharger leurs batteries, qui sont une source essentielle de leur survie. Le compteur de consommation électrique est un composant essentiel de toute conception de moteur RCSF. Les efforts de recherche à publier dans ce sens portent sur le concept d'économie d'énergie.

La problématique entourant le problème d'économie d'énergie des RCSF vise principalement à réduire la puissance consommée au sein d'un nœud et au sein du réseau de nœuds de capteurs actifs (protocoles de réseau) dans le but de prolonger de manière significative la durée de vie du réseau. Les technologies d'économie d'énergie mentionnées dans la littérature sont classées en trois grandes catégories : les approches basées sur le cycle économique, les approches basées sur les données et les approches basées sur la mobilité.

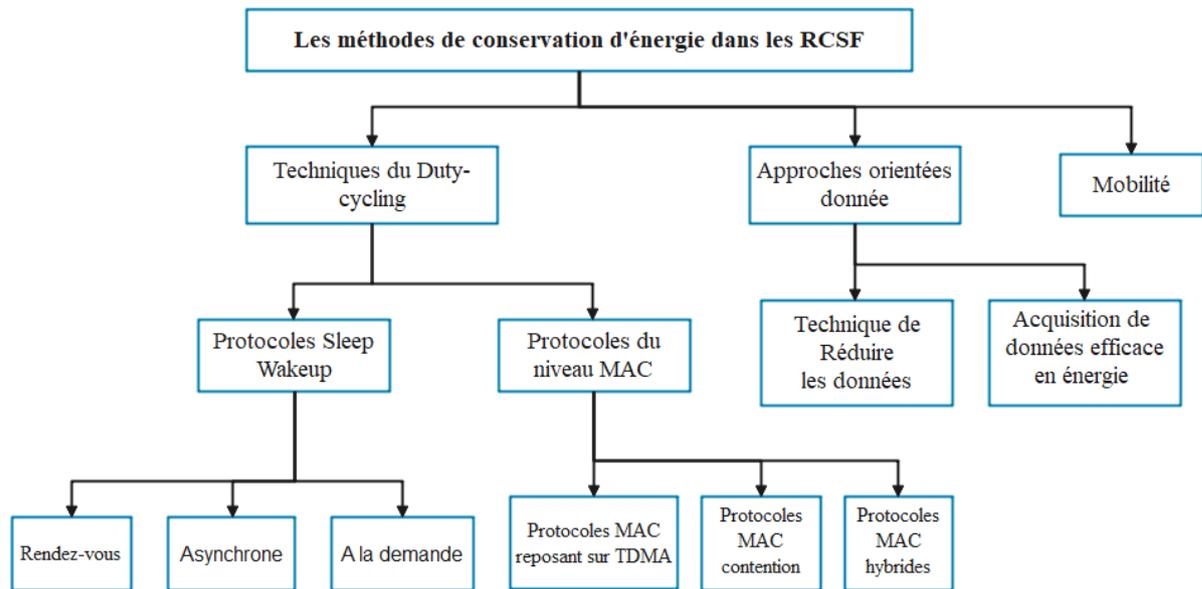


Figure 2.4 : Les méthodes de conservation d'énergie.

2.5.1 Techniques du Duty-cycling:

Cette technologie est principalement utilisée dans l'activité réseau. Le moyen le plus efficace d'économiser de l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode faible consommation lorsque la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et/ou recevoir, et doit être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre des périodes d'activité et de sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement appelé rotation de service. Le cycle de service est défini comme la portion de temps pendant laquelle un contrat est actif.

Étant donné que les nœuds capteurs effectuent des tâches collaboratives, ils doivent coordonner leurs heures de sommeil et de réveil. Ainsi, l'algorithme d'ordonnancement veille/sommeil accompagne tout plan de cyclisme. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué basé sur les dates auxquelles les nœuds décident de basculer entre les états actif et de veille. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui permet d'échanger des paquets, même si les nœuds ont un faible rapport cyclique (c'est-à-dire qu'ils dorment la plupart du temps).

Le duty cycling peut être réalisée grâce à deux approches différentes et complémentaires : le contrôle de la topologie et la gestion de l'alimentation.

2.5.1.1 Protocole de contrôle de topologie

Le contrôle de la topologie consiste à trouver le sous-ensemble optimal de nœuds qui fournissent la connectivité réseau. L'idée de base derrière le contrôle de la topologie est

d'exploiter la redondance dans le réseau pour maximiser sa durée de vie. Cela permet d'augmenter la durée de vie, en général, de deux ou trois fois par rapport à un réseau dans lequel tous les nœuds sont actifs simultanément [36, 37].

2.5.1.2 Protocoles de gestion d'énergie

Les protocoles de gestion de l'alimentation sont divisés en protocoles veille/réveil et en protocoles de niveau MAC intégrés. Le tableau suivant donne un aperçu de ces mécanismes:

a) Protocoles Sleep/Wakeup

Comme mentionné précédemment, le schéma sommeil/réveil peut être spécifié pour un composant spécifique (c'est-à-dire le module radio) du nœud de capteur. Nous pouvons observer les principaux schémas veille/sommeil mis en œuvre en tant que protocoles indépendants au-dessus du protocole MAC (c'est-à-dire au niveau de la couche réseau ou de la couche application). Dans le document [38], les protocoles veille/sommeil se répartissent en trois catégories principales : les systèmes à la demande, programmés et asynchrones.

❖ Les protocoles à la demande utilisent la manière la plus intuitive de gérer l'énergie. L'idée de base est qu'un nœud ne devrait se réveiller que lorsqu'un autre nœud veut communiquer avec lui. Le principal problème associé aux systèmes à la demande est de savoir comment notifier un nœud mort qu'un autre nœud est prêt à communiquer avec lui. À cette fin, ces systèmes utilisent généralement de nombreuses radios avec différents compromis entre puissance et performances (c'est-à-dire radio basse vitesse, faible consommation de signal et radio « élevée » mais à forte consommation pour les communications de données.). Le protocole STEM (Scattered Topology and Energy Management) [39], par exemple, utilise deux radios;

❖ Une autre solution est d'utiliser l'approche des rendez-vous programmés. L'idée est que chaque nœud doit se réveiller en même temps que ses voisins. Les nœuds se réveillent généralement selon un programme de réveil et restent actifs pendant une courte période pour communiquer avec leurs voisins. Puis ils se rendorment jusqu'au prochain rendez-vous;

❖ Enfin, un protocole veille/sommeil asynchrone peut être utilisé. Avec les protocoles asynchrones, un nœud peut se réveiller quand il le souhaite et tant qu'il est capable de communiquer avec ses voisins. Cet objectif est atteint par les propriétés qui entrent dans le système veille/sommeil, de sorte qu'aucun échange d'informations entre les nœuds n'est requis. Certains régimes asynchrones veille/sommeil ont été suggérés dans [40].

b) Protocoles du niveau MAC

Plusieurs protocoles MAC pour les RCSF ont été proposés, et bon nombre des dernières technologies et introductions aux protocoles MAC sont disponibles dans la littérature. Nous

nous concentrons principalement sur les problèmes de gestion de l'énergie plutôt que sur les moyens d'accéder aux canaux. La plupart d'entre eux mettent en œuvre un système à faible cycle de service pour gérer la consommation d'énergie. Nous avons identifié les protocoles MAC les plus courants en les classant en trois catégories : les protocoles basés sur TDMA (Time Division Multiplexing Access), les protocoles de contention et les protocoles hybrides .

❖ *Protocoles MAC reposant sur TDMA*

Dans les protocoles MAC basés sur la méthode TDMA [41, 42, 43], le temps est divisé en trames (périodiques) et chaque trame se compose d'un certain nombre de créneaux. Un ou plusieurs créneaux sont affectés à chaque trame, selon un algorithme d'ordonnement particulier. Il utilise ces slots pour envoyer/recevoir des paquets vers/depuis d'autres nœuds.

Dans de nombreux cas, les nœuds sont regroupés pour former des clusters avec un en-tête qui est responsable de l'allocation des emplacements des nœuds dans leur cluster (par exemple, Bluetooth [44], LEACH [45] et MAC basé sur l'énergie TDMA [46]).

❖ *Protocoles MAC avec contention*

Les protocoles de litige sont les plus courants et représentent la majorité des protocoles MAC proposés aux RCSF. Il assure le cycle de service grâce à l'étroite intégration des fonctions d'accès aux canaux avec le système sleep/wakeup. La seule différence est que l'algorithme veille/sommeil dans ce cas n'est pas un protocole indépendant.

❖ *Protocoles MAC hybrides*

L'idée de base des protocoles MAC hybrides (modifier le comportement du protocole entre TDMA et CSMA en fonction du niveau de contention) n'est pas nouvelle. En ce qui concerne les RCSF, Zebra MAC (Z-MAC) [47] est l'un des protocoles les plus intéressants. Afin de définir le schéma maître de contrôle de transmission, Z-MAC commence par une phase de configuration initiale. Chaque nœud crée une liste de contiguïté en deux étapes via le processus de découverte de contiguïté. Ensuite, l'algorithme de slot distribué est appliqué pour s'assurer que deux nœuds dans un voisinage composé d'un saut ne sont pas alloués au même slot. Par conséquent, il est garanti que la transmission d'un nœud avec l'un de ses voisins à partir d'un saut n'interfère pas avec les transferts.

2.5.2 Approches orientées donnée

En général, les plans vélo ne prennent pas en compte les données collectées par les nœuds. Par conséquent, les méthodes basées sur les données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité énergétique. En effet, la détection (ou la collecte de données) affecte la consommation d'énergie de deux manières:

❖ Échantillonnage inutile : les données d'échantillonnage contiennent souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelles [48], il n'est donc pas nécessaire de signaler des informations redondantes au SB. Un échantillonnage inutile signifie à son tour une consommation d'énergie inutile. En fait, même si le coût d'échantillonnage est minime, cela stimule également les communications le long du chemin emprunté par le message.

❖ Consommation électrique de l'unité de détection : Il ne suffit pas de réduire le contact lorsque le capteur lui-même consomme beaucoup.

Les technologies orientées données sont conçues pour réduire la quantité d'échantillonnage de données tout en garantissant un niveau de précision acceptable dans la détection des applications.

2.5.2.1 Technique de Réduire les données

La réduction des données en termes de taille ou de nombre de paquets dans le réseau peut avoir un impact significatif sur la consommation électrique due à la connexion. Parmi les méthodes de réduction de données, on trouve le traitement intra-réseau, qui consiste à effectuer une agrégation de données (par exemple, faire la moyenne de certaines valeurs) au niveau de nœuds intermédiaires entre la source et le puits. Ainsi, la quantité de données est réduite lors de la traversée du réseau vers le récepteur. Collecte appropriée de données spécifiques à l'application. La dernière technologie de traitement en réseau est présentée dans le document [48].

La compression des données peut également être appliquée pour réduire la quantité d'informations transmises par les nœuds sources. Ce système comprend le codage des informations au niveau des nœuds qui génèrent les données, et le décodage au niveau du puits. Il existe différentes méthodes de compression de données mentionnées dans [49].

2.5.2.2 Acquisition de données efficace en énergie

De nombreuses applications émergentes ont des applications avec de réelles limitations dues à la découverte. Cela va à l'encontre de l'hypothèse générale selon laquelle la découverte n'est pas significative du point de vue de la consommation d'énergie. En fait, la consommation électrique du module capteur peut non seulement être importante, mais peut également être supérieure à la consommation électrique de la radio ou même supérieure à la consommation électrique du reste du nœud capteur [50]. Cela peut être dû à divers facteurs [51].

❖ *Transducteur gourmand en énergie* : Certains capteurs ont intrinsèquement besoin d'une puissance élevée pour effectuer leur tâche d'échantillonnage. Par exemple, les capteurs d'images à semi-conducteurs métalliques complémentaires (CMOS), ou encore les capteurs

multimédia [52] nécessitent généralement une puissance importante. Les capteurs chimiques ou biologiques peuvent également être énergivores.

❖ *Convertisseurs A/D gourmands* : les capteurs tels que les transducteurs acoustiques et sismiques [53] nécessitent généralement des transducteurs A/N à haute vitesse et haute résolution. La consommation électrique des transformateurs représente la plus grande part de la consommation électrique du sous-système de détection.

❖ *Capteurs actifs* : Une autre classe de capteurs permet d'obtenir des données sur le phénomène perçu grâce à l'utilisation de transducteurs actifs (ex : sonar, radar ou laser). dans ce cas, Les capteurs doivent envoyer un signal sonore pour obtenir des informations sur la quantité observée, comme dans [54].

❖ *Temps d'acquisition long* :

Le temps d'acquisition peut être de l'ordre de plusieurs centaines de millièmes de seconde, voire de quelques secondes. Par conséquent, la puissance consommée par le sous-système de détection peut être élevée, même si la consommation électrique du détecteur reste modérée.

Dans ce cas, réduire les connexions peut ne pas suffire, mais les stratégies d'économie d'énergie devraient en fait réduire le nombre d'acquisitions (échantillons de données). Il convient également de préciser que les techniques d'acquisition de données économes en énergie ne sont pas exclusivement destinées à réduire la consommation électrique de l'unité de détection. En réduisant les données collectées par les nœuds sources, cela réduit également le nombre de connexions. En fait, de nombreuses technologies d'acquisition de données économes en énergie sont conçues pour réduire la puissance consommée par la radio, en supposant que la consommation radio est négligeable.

2.5.3 Mobilité

Combinée à des approches basées sur la rotation et le travail, la mobilité des nœuds peut, lorsque cela est possible, être une solution efficace pour réduire la consommation d'énergie. En effet, dans un réseau de capteurs stationnaires, les paquets provenant des nœuds traversent le réseau vers le creux en suivant des chemins multi-sauts. Lorsque le puits est en soi statique, certains chemins peuvent se charger plus que d'autres, en fonction de la structure du réseau et des taux de génération de paquets des nœuds sources.

Généralement, les nœuds proches du récepteur sont chargés de transmettre plus de paquets, vous verrez donc leur niveau de batterie s'épuiser rapidement. Cela se produira même si des techniques de conservation de l'énergie sont appliquées, comme mentionné ci-dessus.

Les nœuds d'assemblage mobiles, connus sous le nom de Data Mules [55], réduisent la consommation d'énergie. En fait, il s'agit d'appareils portables dont nous pouvons contrôler le mouvement pour offrir une alternative à l'ensemble de données classique des nœuds capteurs dispersés dans l'espace. Des mules de données sont réparties dans la zone de supervision et entrent en contact avec chaque nœud lorsqu'il se trouve à proximité immédiate de celui-ci. Ainsi, les nœuds statiques attendront le passage de la mule de données pour leur transmettre leurs données. Ce dernier se chargera de transmettre les données à la blanchisserie. Par conséquent, les nœuds de capteurs fixes peuvent économiser de l'énergie en réduisant la longueur des chemins de routage, les conflits et les dépenses de diffusion.

2.6 Conclusion

La durée de vie du réseau de capteurs est étroitement liée à la vie nodale. Ce dernier, pour sa part, dépend principalement de la consommation électrique du nœud. Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base liées à la conservation.

CHAPITRE 3

Protocoles du routage dans les RCSFs

Sommaire :

3.1 Introduction

3.2 Définition de routage

3.3 Classification des protocoles de routage

3.4 Exemples des protocoles de routage hiérarchiques

3.5 Conclusion

3.1 Introduction

Dans les réseaux sans fil, les protocoles de routage sont utilisés pour créer des chemins entre les nœuds afin d'acheminer les paquets entre eux. De plus, dans les réseaux de capteurs, les protocoles de routage créent des chemins entre n'importe quel nœud de réseau et station de base pour assurer la précision du routage. Les directives de la RCSF devraient tenir compte de deux limitations. Tout d'abord, il renvoie rapidement les informations du nœud à la station de base en utilisant le chemin le plus court. Deuxièmement, il transmet les informations à la station de base à moindre coût en termes de consommation d'énergie.

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu global de RCSFs. Nous commençons par définir le routage et le protocole de routage, puis classifions le protocole de routage, et enfin nous nous intéressons aux différentes approches proposées pour le routage hiérarchique des données sur les réseaux RCSFS.

3.2 Définition de routage

Le routage est un processus qui permet de sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. On parle de routage dans différents domaines : réseaux téléphoniques, réseaux électroniques (comme Internet), réseaux de transports.....[56]

L'objectif principal d'un protocole de routage pour un réseau de capteurs sans fil est l'établissement correct et efficace d'itinéraires entre une paire de nœuds afin que des messages puissent être acheminés. Le protocole de routage permet aux nœuds de se connecter directement les uns aux autres pour relayer les messages par des sauts multiples et de transmettre les données vers un point de collecte.

3.3 Classification des protocoles de routage

De nombreuses stratégies de routage ont été créées pour les réseaux de capteurs :

- Certains sont des ajustements de politique existants pour d'autres types de réseaux.
- Et d'autres spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil.

Les protocoles publiés dans le domaine des RCSF ont été largement étudiés et peuvent être classés selon un certain nombre de critères. Dans cette section, la classification des protocoles de routage selon trois critères est détaillée[57]. Les figure (3.1, 3.2, 3.3) représente la classification des protocoles de routage selon les critères suivantes: structure de réseau, l'établissement de la route et le type de protocole[58].

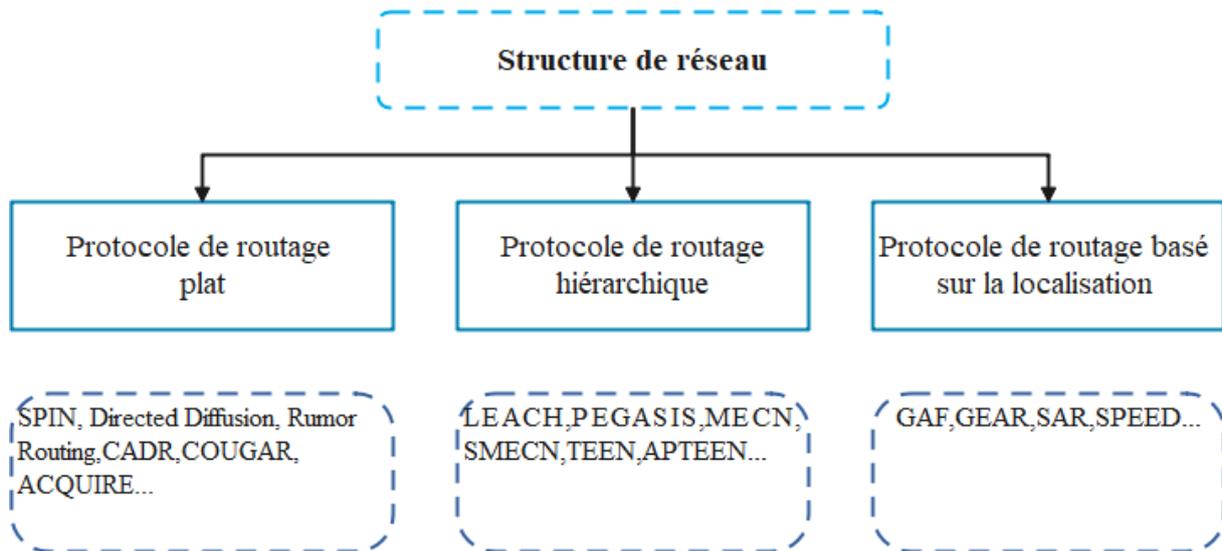


Figure 3.1 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau.

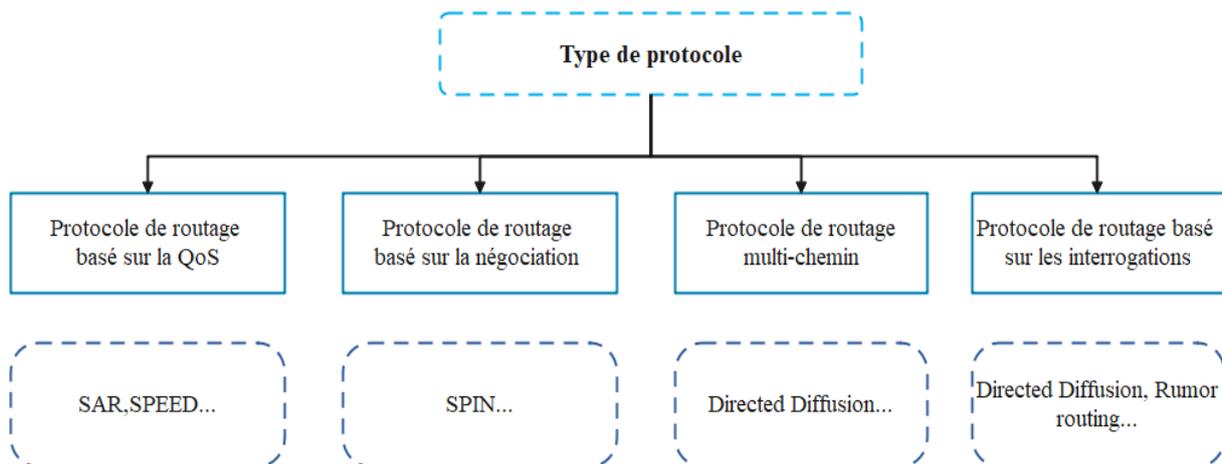


Figure 3.2: Protocoles de routage pour les RCSF selon le type de protocole.

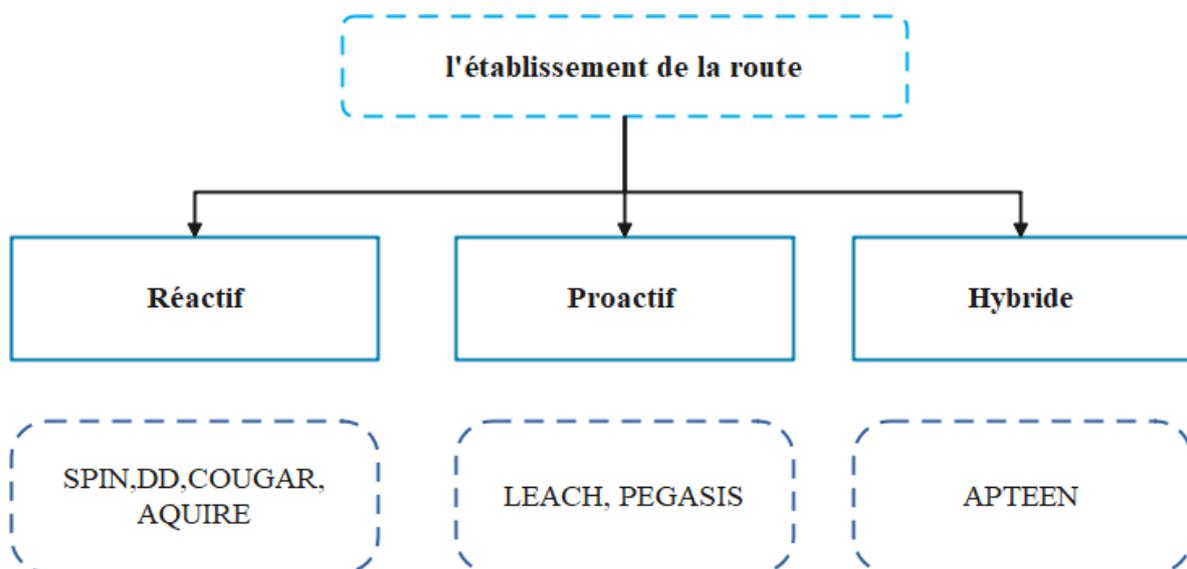


Figure 3.3 : Protocoles de routage pour les RCSF selon l'établissement de la route.

3.3.1 Classification selon la structure du réseau

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

3.3.1.1 Protocoles de routage plat (flat based-routing)

Ces protocoles considèrent que tous les nœuds sont identiques, c'est à dire ont les mêmes fonctions à exécuter sauf le nœud de contrôle (*sink*) qui est chargé de collecter toutes les informations issues des différents nœuds capteurs pour les transmettre vers l'utilisateur final. La décision d'un nœud de router des paquets vers un autre dépendra de sa position et pourra être remise en cause au cours du temps.

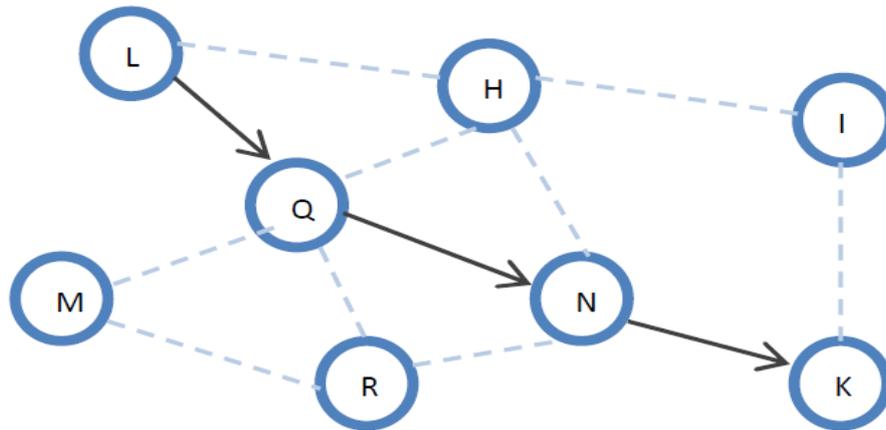


Figure 3.4 : Routage plat.

3.3.1.2 Protocoles hiérarchiques

Ces protocoles fonctionnent en attribuant différents rôles aux nœuds du réseau. Certains nœuds sont spécifiés pour exécuter certaines fonctions. Un nœud peut être, par exemple, une passerelle vers un groupe de nœuds. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les portes pour atteindre le nœud destinataire qui lui est directement associé.

Un exemple est donné par la figure 2.4 : Pour que les paquets générés par le nœud F atteignent le nœud L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R.

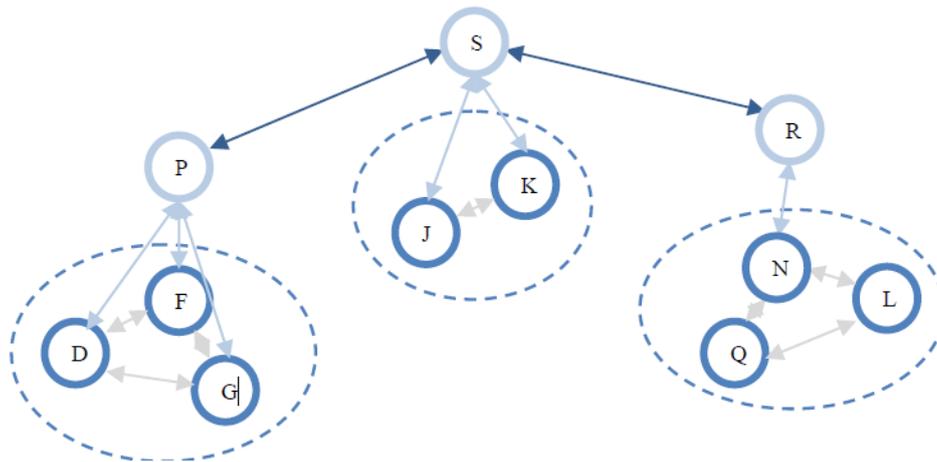


Figure 3.5 : Routage hiérarchique.

Le principe des protocoles de routage hiérarchique est basé essentiellement sur les nœuds passerelles. En fait, les nœuds ordinaires savent que si le destinataire n'est pas dans leur voisinage direct, il suffit d'envoyer la requête à la passerelle qui la prendra en charge. À son tour, elle transmettra cette requête vers le nœud ciblé. Ce type de routage présente de nombreux avantages pour les réseaux dont leurs nœuds sont sédentaires et disposent de suffisamment d'énergie [59].

3.3.1.3 Protocoles de routage avec localisation géographique

Un routage est dit géographique lorsque les décisions de routage sont basées sur la position des nœuds [60]. Les pré-requis pour effectuer un routage géographique dans un réseau ad hoc sont :

- ❖ Tous les nœuds possèdent un moyen de localisation, soit un système natif comme le GPS (*Global Position System*), soit un système logiciel comme un protocole de localisation.
- ❖ Un nœud source connaît toujours la position du nœud destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds, soit un service de localisation doit être utilisé.

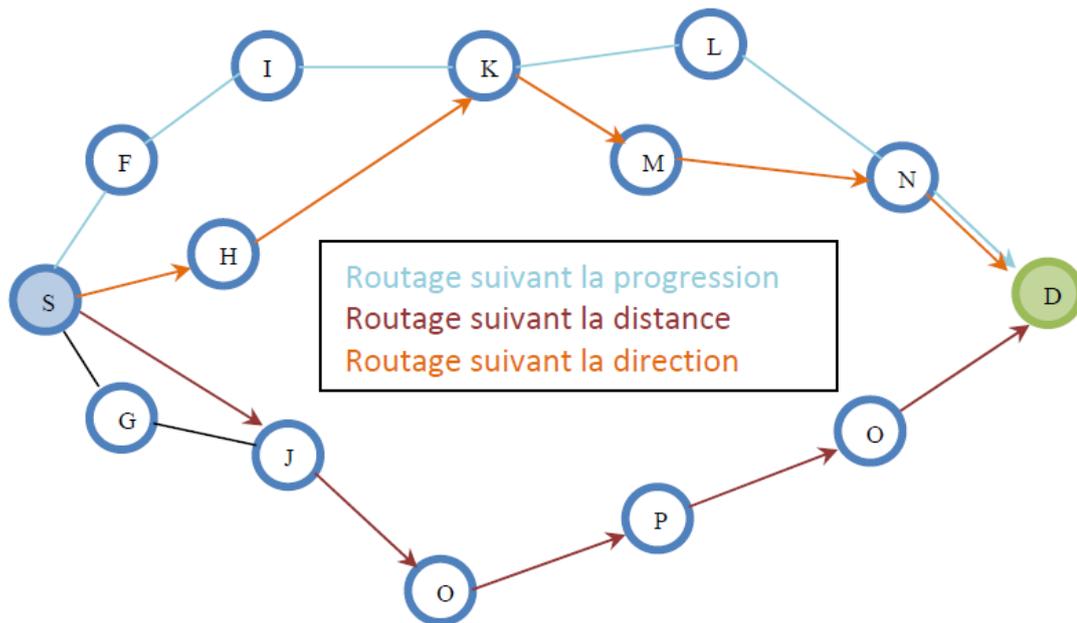


Figure 3.6 : Routage basé sur la localisation.

3.4 Exemples des protocoles de routage hiérarchiques

3.4.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Ce protocole est proposé par W. R. Heinzelman et.al qui minimise la dissipation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Il est basé sur un mécanisme de clustering simple par lequel l'énergie peut être conservée puisque les têtes de cluster sont sélectionnées pour la transmission de données au lieu d'autres nœuds. Le fonctionnement de LEACH est divisé en tours, L'algorithme se déroule en rounds (tours) qui ont approximativement le même intervalle de temps déterminé au préalable. Où chaque cycle commence par une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission. Afin de minimiser les frais généraux, la phase d'initialisation permanente est longue par rapport à la phase set-up . [61]

a) Phase d'initialisation : Au cours de cette phase, chaque nœud décide de devenir ou non un cluster head (CH) pour le tour en cours. Cette décision est basée sur le choix d'un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si le nombre est inférieur au seuil $T(n)$, le nœud devient un cluster head pour le tour en cours. La valeur de seuil est définie comme :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p*(r \bmod \frac{1}{p})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Avec:

p: pourcentage des nœuds désirant devenir cluster-head.

r: numéro du round courant.

G: ensemble de nœuds n'ayant pas été élus cluster-heads durant les $1/P$ dernières périodes

Une fois le chef de cluster choisi, il utilisera le protocole CSMA MAC pour annoncer son statut. Les nœuds restants prendront la décision concernant leur chef de cluster pour le tour en cours en fonction de la force du signal reçu du message publicitaire. Avant le début de la phase d'initialisation permanent, certains paramètres sont pris en compte, tels que la topologie du réseau et les coûts relatifs de calcul par rapport à la communication. Un programme d'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) est appliqué à tous les membres du groupe de cluster pour terminer les messages vers le CH, puis vers le chef de cluster vers la station de base. Dès qu'un cluster head est sélectionné pour une région, la phase d'initialisation permanent démarre. La figure 2.2 montre l'organigramme de cette phase. [61]

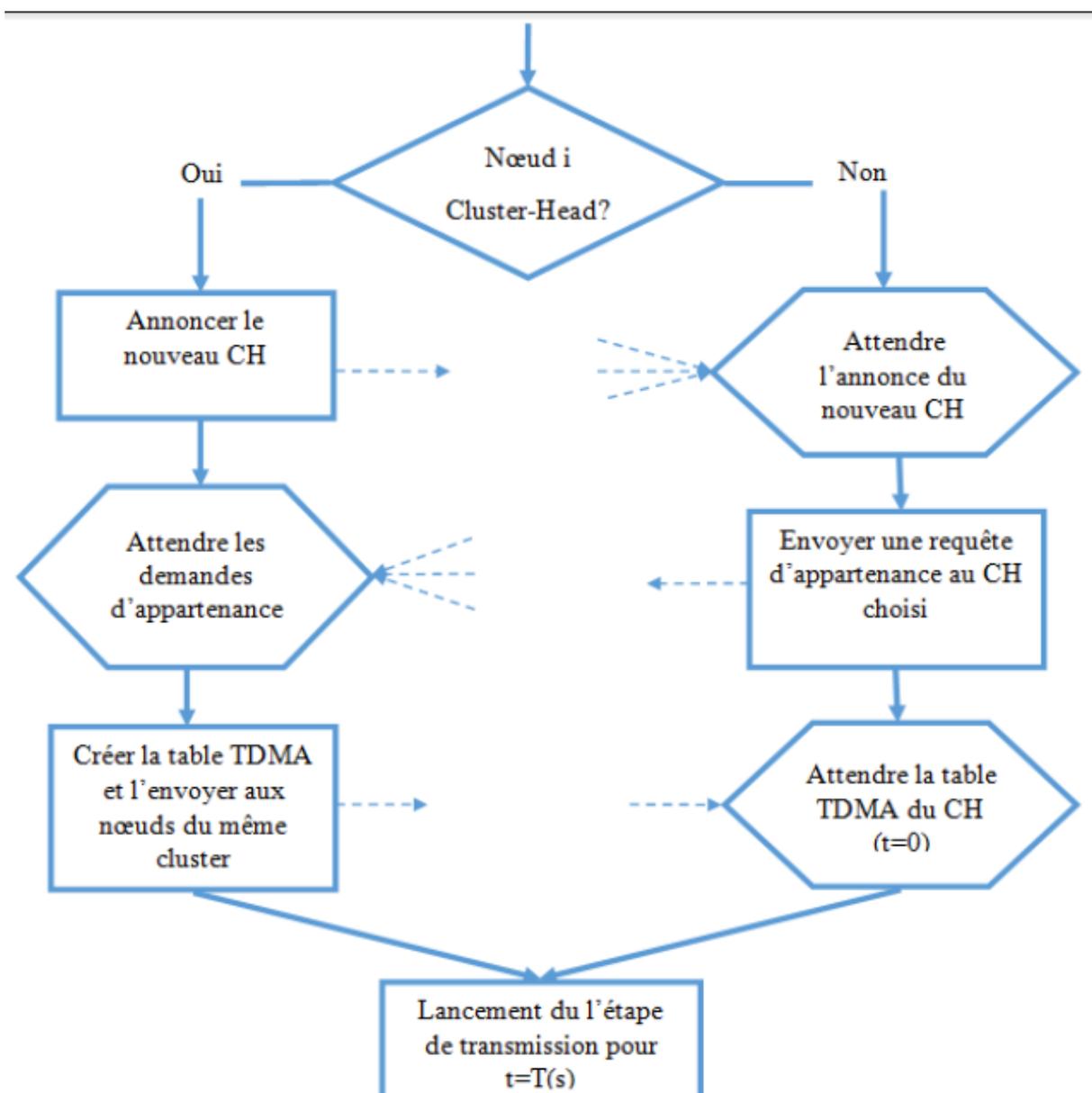


Figure 3.7 : Organigramme de l'algorithme de formation de clusters distribué pour LEACH.

b) Phase de transmission : Chaque chef de groupe, basé sur l'approche TDMA, établit et diffuse un ordonnancement affectant à chaque membre du groupe un temps durant lequel il peut communiquer les données captés au chef [62].

Une fois l'ordonnancement est connu par tous les nœuds du même groupe, chacun d'eux utilise le temps qui lui a été consacré pour transmettre au chef les données captées. Le chef de groupe exécute, par la suite, des algorithmes de fusion de données pour agréger les données reçues et minimiser ainsi la quantité d'information transmise à la station de base [62].

Avantages :

- ❖ LEACH est complètement distribué. LEACH ne nécessite pas le contrôle informations de la station de base, et les nœuds ne nécessitent pas de connaissances du réseau mondial pour que LEACH fonctionne. [63]

Désavantages:

- ❖ La sélection CH est aléatoire, cela ne prend pas en compte l'énergie consommation.
- ❖ Il ne s'adapte pas bien à une grande surface .
- ❖ Les CH ne sont pas distribués uniformément ; Les CH peuvent être situés aux bords du groupe.

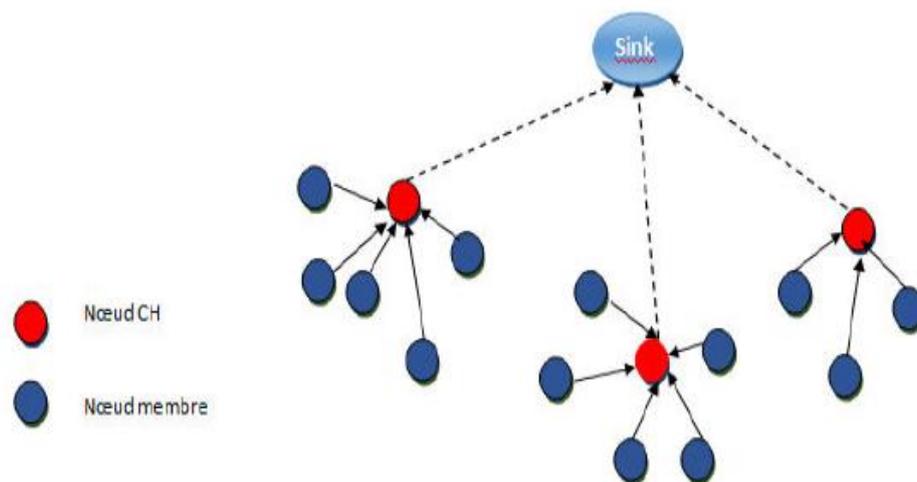


Figure 3.8 : Algorithme de routage LEACH.

3.4.2 PEGASIS [61]

- PEGASIS est un protocole basé sur la structure de la chaîne.

- PEGASIS repose sur les mêmes hypothèses que LEACH, de plus il suppose que :

- ❖ Chaque nœud maintient les informations de localisation des nœuds voisins.
- ❖ Les nœuds sont capables de modifier leurs puissances de transmission.
- ❖ PEGASIS est destiné aux applications proactives. -Comme LEACH, PEGASIS se

déroule en rounds. Chaque round se compose de 3 phases :

a) *Phase de formation d'une Chaîne*

- ❖ Au début de chaque round, chaque nœud cherche le voisin le plus proche par l'envoi d'un signal atténué graduellement, jusqu'à ce qu'il soit reçu par un seul nœud.
- ❖ Appliquer 'Greedy algorithm' pour déterminer la tête de la chaîne qui est généralement le plus éloigné nœud de la *SB*.
- ❖ La construction de la chaîne commence par la tête jusqu'à la *SB* en maintient dans chaque nœud la liaison entre son prédécesseur et son successeur dans la chaîne.

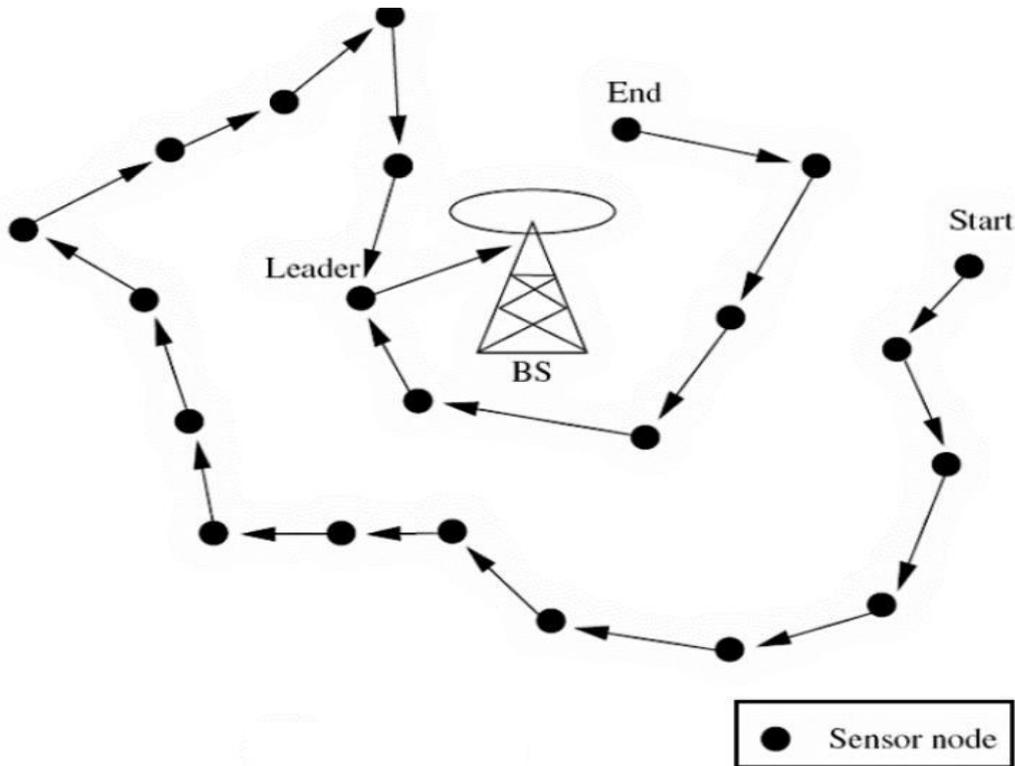


Figure 3.9 : Illustration de protocole PEGASIS [64].

b) *Itération pour sélection d'un nœud leader*

- ❖ Choisir un nœud leader (*NL*) qui prend en charge la communication avec la *SB*
- ❖ Une fois que tous les nœuds prennent le rôle d'un *NL*, un nouveau round de création d'une chaîne commencera et ainsi de suite.

c) **Phase de transmission des données**

- ❖ La *SB* envoie un jeton à la tête de la chaîne pour initier la transmission des données
- ❖ Dès que la tête reçoit ce jeton il commence de transmettre leurs données à son successeur. Donc la transmission est réalisée de telle sorte que chaque nœud agrège les données de son prédécesseur avec les siennes et ce jusqu'à ce que toutes les données soient arrivées au *NL*.
- ❖ Dès lors, les données agrégées peuvent être transmises directement à la *SB*.

• Avantages

- ❖ La réduction du nombre d' émissions et de réceptions en utilisant l'agrégation de données.
- ❖ La minimisation de la dissipation de l' énergie en favorisant les communications locales et en réduisant la quantité de données transmises à la *SB*.
- ❖ La distribution de la charge causée par la transmission *NL-SB* sur l'ensemble des nœuds.

Inconvénients :

- ❖ Introduction d'un overhead significatif, causée par l'ajustement dynamique de la topologie.
- ❖ La mise en veille des nœuds est impossible pour ne pas rater le jeton.
- ❖ Les délais de transmission sont élevés pour les nœuds qui sont loin de la *SB*.
- ❖ Le risque de congestion au niveau d'un *NL* est fort.
- ❖ PEGASIS ne garantit pas la livraison des données à la *SB* car un *NL* peut tomber en panne.
- ❖ PEGASIS ne convient pas aux réseaux déployés dans de vastes régions.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude sur la classification des protocoles de routage selon les trois critères: structure de réseau, l'établissement de la route et le type de protocole. Ensuite nous avons présenté les deux protocoles hiérarchiques les plus connus: le protocole LEACH et le protocole PEGASIS.

CHAPITRE 4

Algorithme GRASP et travaux liés

Sommaire :

4.1 Introduction

4.2 Historique

4.3 Définition de l'algorithme GRASP

4.4 Principe de GRASP

4.5 Travaux liés

4.6 Conclusion

4.1 Introduction

Il existe un grand nombre d'algorithmes de clustering pour les RCSF. L'objectif est de rechercher des solutions aux problèmes d'optimisation dans divers domaines dans ce cadre. Dans ce chapitre, nous aborderons l'algorithme GRASP et son principe de fonctionnement, puis les différents domaines d'application, et à la fin nous montrerons quelques travaux liés à l'application de cet algorithme à la problématique de la consommation et des économies d'énergie dans les réseaux RCSF.

4.2 Historique

GRASP a été initialement proposé par Thomas A. FEO (Université du Texas) et Mauricio GC RESENDE (Université de Californie) en 1989 dans un article de presse - Operations Research Letters. Un article visant à résoudre le problème de la couverture de groupe de manière efficace, en utilisant l'approche semi-gourmande de Schwattal et la recherche locale. Après son introduction, GRASP a été appliqué dans un grand nombre de travaux scientifiques, notamment en recherche opérationnelle et en informatique théorique. Plusieurs améliorations sont apparues dans GRASP de base, et l'hybridation avec d'autres propriétés descriptives depuis 1989. [65]

4.3 Définition de l'algorithme GRASP

GRASP (Greedy Random Adaptive Search Procedure) est un algorithme méta heuristique à démarrages multiples utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation agrégée, chaque itération de cet algorithme se déroule en deux étapes, la première - l'étape de construction - essayant de construire une solution selon l'algorithme semi-glouton (semi-Greedy) et le second - l'étape de recherche locale - Vous essayez d'améliorer la solution créée à la première étape, par la recherche locale. La solution finale sera la meilleure solution obtenue [66] .

4.4 Principe de GRASP

4.4.1 fonctionnement

GRASP est un algorithme méta-heuristique basé sur deux techniques d'optimisation largement connues, il s'agit de l'algorithme glouton (Greedy) et la recherche locale.

Pour un nombre d'itérations donné, nous implémentons la construction de la solution selon une heuristique semi-glouton (Randomized Greedy), puis on applique une recherche locale au voisinage de cette solution afin d'obtenir la solution optimale locale, la solution finale qui sera la meilleure solution obtenue parmi toutes les solutions pour chaque itération. Notez l'indépendance des itérations dans GRASP. [65] [67]

La figure suivante montre l'organigramme général du processus GRASP.

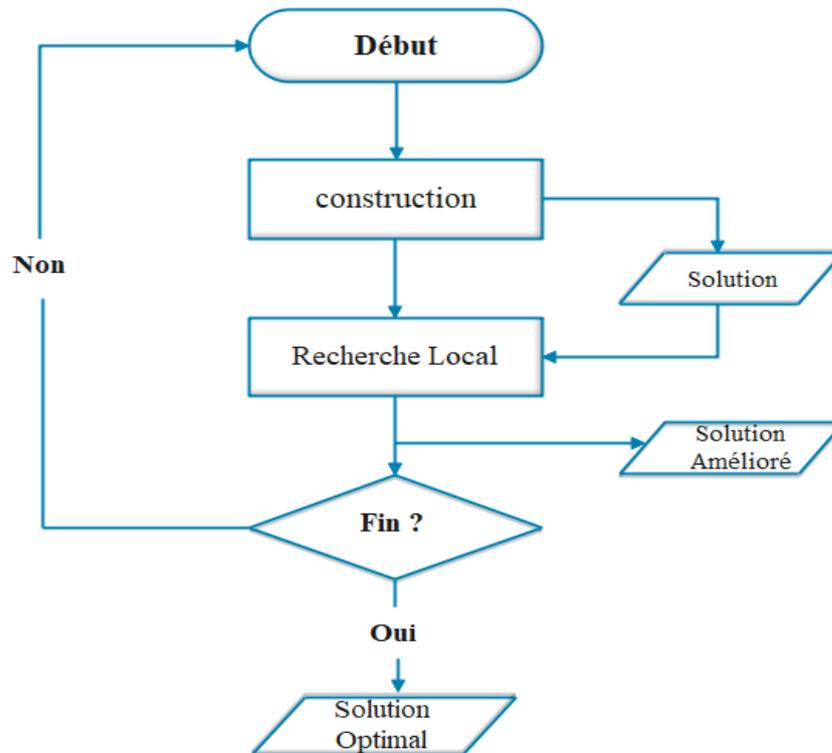


Figure 4.1: l'Organigramme générale de GRASP

4.4.1 Phase de construction

On considère le problème de minimisation suivant : [68]

- ❖ $E = \{1 \dots n\}$: ensemble de base
- ❖ $F \subseteq 2^E$: ensemble de toutes les solutions possible
- ❖ $f: F \rightarrow \mathbb{R}$: la fonction objective (à minimiser)
- ❖ S^* : solution optimale, telle que $f(S^*) \leq f(S) \forall S \in f$

On considère comme l'étape la plus importante de tout le processus GRASP, une solution potentielle $s \in F$ est générée à partir des éléments $e \in E$; Élément par élément après une heuristique semi-glouton, qui est un algorithme glouton alimenté par un côté aléatoire. Avant de construire la solution, il faut définir une liste de tous les composants possibles ($e \in E$), c'est la liste des candidats (C) (candidate list), le surcoût $c(e)$ doit être évalué pour chaque élément C , cela nous permettra de choisir les meilleurs éléments et de les mettre dans une autre liste C'est ce qu'on appelle : Liste limitée des candidats (Restricted Candidate List – RCL). [65]

La construction RCL est régie par le paramètre $\alpha \in [0,1]$ qui contrôle la qualité et le nombre d'éléments à inclure. Pour le problème de minimisation, le RCL est généré comme suit :

$$RCL \leftarrow \{e \in C \mid c(e) \leq cMin + \alpha(cMax - cMin)\} \dots \dots \dots \text{éq(4.1)}$$

Avec :

- ❖ c_{Min} , c_{Max} : le cout incrémental minimal, resp maximal depuis la liste C
- ❖ $c(e)$: le cout incrémental de l'élément e

Pour $\alpha = 0$, le RCL aura toujours le meilleur élément pour C , pour toutes les itérations, cela rendra la recherche purement gloutonne (Greedy), au contraire, pour $\alpha = 1$, la recherche sera complètement aléatoire. C'est la construction du RCL qui donne le côté glouton (Greedy) à GRASP.



Figure 4.2: L'influence du paramètre α

Après avoir construit la RCL, on prend – aléatoirement - un élément de celle-ci et on l'incorpore à la solution en cours de construction – c'est l'aspect aléatoire (random) du GRASP. Ensuite, on met à jour l'ensemble C , les couts incrémental des éléments de C , et la RCL, ceci est l'aspect adaptatif (adaptive) de l'algorithme. La construction continue de cette manière jusqu'à ce qu'on obtient une solution complète.

Le pseudo code pour la construction est donnée dans la figure suivante :

```

Procédure GreedyRandomizedConstruction( $\alpha$ )
  Solution  $\leftarrow \emptyset$ 
   $C \leftarrow E$ 
  Evaluation du cout incrémental  $c(e)$   $e \in C$ 
  Tant-Que  $C \neq \emptyset$  faire
     $c_{Min} \leftarrow \min\{c(e), e \in C\}$ 
     $c_{Max} \leftarrow \max\{c(e), e \in C\}$ 
     $RCL \leftarrow \{e \in C / c(e) \leq c_{Min} + \alpha(c_{Max} - c_{Min})\}$ 
    Sélection aléatoire de  $s$  depuis RCL
    Mise à jour de  $C$ 
    Réévaluation du cout incrémental pour  $e \in C$ 
  Fin Tant-Que
  Retourne Solution
Fin GreedyRandomizedConstruction
  
```

Figure 4.3: Pseudocode de la phase de construction

La solution générée par cette approche n'est pas forcément optimale, même dans un contexte local, c'est c'est pour ça qu'on est obligé de faire une recherche locale.

4.4.2 Phase de Recherche local

L'objectif de cette étape est d'optimiser la solution obtenue à l'étape précédente afin d'obtenir la solution optimale locale. L'optimisation se fait en appliquant un algorithme de recherche locale à la solution. La qualité de la solution résultante dépend de la structure du voisinage, de la technologie de recherche et de la solution de départ elle-même. [69]

La recherche locale est un algorithme itératif qui va remplacer la solution courante par une meilleure solution à proximité, l'algorithme s'arrête lorsqu'aucune meilleure solution n'est trouvée (best local), et deux stratégies de recherche sont envisagées : [67]

- ❖ **Best-improving** : on examine tous les voisins, et on remplace la solution par le meilleur voisin.
- ❖ **First-improving** : on remplace la solution initiale par le premier meilleur voisin qu'on trouve.

En pratique, ces deux approches conduisent à la même solution, cependant, la recherche utilisant la première approche d'optimisation n'est pas coûteuse en temps de calcul.

La figure suivante montre le pseudo-code pour une recherche locale:

```

Procédure RechercheLocal(Solution)
  Tant-Que (Solution non optimal) faire
    Rechercher  $S'$  tq  $f(S') \leq f(\text{Solution})$ 
    Solution  $\leftarrow S'$ 
  Fin Tant-Que
  Retourne Solution
Fin RechercheLocal
  
```

Figure 4.4: Pseudo code de la recherche locale

Après cette étape, nous aurons la solution localement optimale que nous comparerons aux solutions obtenues à chaque itération, sachant que chaque itération est indépendante de l'autre, et continue de la même manière. La solution finale sera la meilleure solution obtenue. [65]

GRASP n'a que deux paramètres à définir, le nombre d'itérations MAX_ITER et α . Plus le nombre d'itérations est élevé, meilleure est la solution, bien que la probabilité d'obtenir une meilleure solution diminue au fur et à mesure que les itérations progressent. Le paramètre peut avoir un impact significatif sur la qualité de la solution finale. Puisque le temps de calcul ne varie pas trop d'une itération à l'autre, il dépend du nombre d'itérations (MAX_ITER).

4.4.3 Domaines d'application

GRASP a été principalement conçu pour être utilisé dans la résolution de problèmes de recherche opérationnelle, en particulier le problème de couverture, qui a fait l'objet de la première publication définissant l'algorithme GRASP. Cela n'a pas empêché les chercheurs d'utiliser GRASP pour résoudre une série de problèmes, notamment : [70]

- ❖ Le routage
- ❖ SAT (Logique)
- ❖ L'optimisation des graphes.
- ❖ Ordonnancement, Production.
- ❖ Télécommunications (conception de réseau)
- ❖ Conception VLSI
- ❖ ...etc.

4.4.4 Avantages et Inconvénient

GRASP c'est l'une des méthodes méta-heuristiques qui présente des avantages prometteurs pour les problèmes d'optimisation combinatoire ; parmi lesquels on note : [65]

- a) **Nombre de paramètres à régler** : il n'y'a que deux paramètres à manipuler ; α et le nombre des itérations.
- b) **Temps de calcul** : par rapport à d'autres méta-heuristiques, l'algorithme consomme moins de temps CPU, et il est prédictible.
- c) **Parallélisations** : peut-être trivialement implémenté en parallèle, donc un gain considérable en temps de calcul.
- d) **Implémentation** : relativement plus simple à implémenter.

Néanmoins, comme toute méta-heuristique, GRASP est loin d'être une méthode parfaite : [65]

- a) **Incertitude sur la qualité de la solution** : la solution finale dépend toujours sur les paramètres de l'algorithme.
- b) **Construction sans mémoire** : Informations non sauvegardées d'une itération à l'autre.

4.5 Travaux liés

4.5.1 GRASP pour la Sélection des Clusterheads dans WSN:

Les auteurs dans [71] ont proposé une technique basée sur l'algorithme GRASP défini dans cette étude vise à deux procédures clés (Figure 1) : (i) la Phase Constructive (PC), qui construit une solution réalisable (étapes 1 à 3) et ; (ii) Locale Phase de recherche (LSP), qui

visé à apporter des améliorations dans le CP (Étapes 4 à 6). Dans la figure 4.5, l'étape 1 définit la phase constructive où seuls les nœuds qui ont plus d'énergie qu'une valeur minimale (E_{min}) constitueront une liste préliminaire, appelée la Liste des Candidats (LC). Pour obtenir la valeur E_{min} , indiquée dans l'équation 2, il faut noter que les clusters ont le même nombre de nœuds. Si l'on suppose que RL (Requested Load) est le nombre de données prédéfinies pour la durée d'un tour, et k est la taille du message, $(RL/k) / n_{ch}$ est défini comme étant le nombre attendu de messages qu'un clusterhead devra recevoir pour porter l'agrégation des données. où E_{rx} est l'énergie pour la réception des messages, E_{DA} est l'énergie pour l'agrégation des données, E_{tx} est la énergie pour la transmission, d_s est la distance du clusterhead à la station de base S et k est le paquet avec le message. À l'étape 2, une liste restreinte de candidats (RLC) est formée par les nœuds d'intervalle $[C_{max} + \alpha(C_{min} - C_{max}), C_{max}]$, où C_{min} et C_{max} représentent les nœuds inférieur et supérieur coûts énergétiques, respectivement, et α est un nombre réel choisi à aléatoire dans l'intervalle $[0, 1]$. Les nœuds RLC sont disposés en ordre décroissant de l'énergie. A l'étape 3, la liste CH est obtenue, qui contiendra les nœuds candidats clusterhead, qui sont choisis au hasard dans le RLC.

La phase de recherche locale commence à l'étape 4, où pour chaque nœud $ch \in CH$, une recherche dans son voisinage est effectuée et il est déterminé s'il y a une amélioration de l'objectif fonction qui peut être réalisée, en échangeant un nœud ch contre un de ses voisins (ch'). L'étape 5 indique l'échange de la ch nœud avec son voisin ch' , en cas d'amélioration. Enfin en 6, on retourne la liste CH' qui contient les meilleurs ch' .

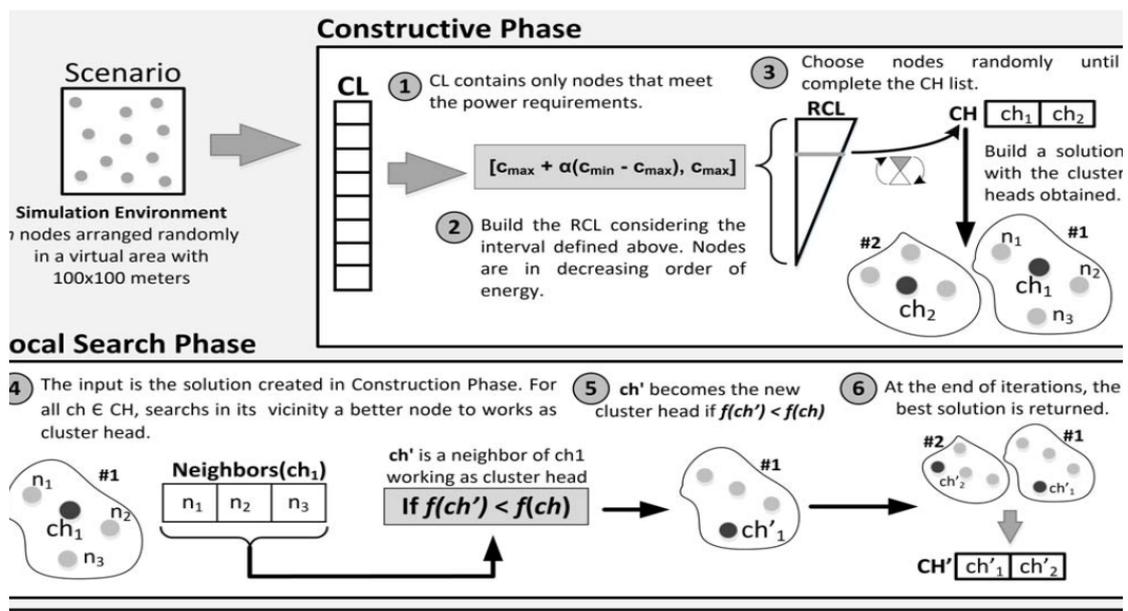


Figure 4.5: Description de la phase constructive et du local recherche de l'algorithme GRASP.

4.5.2 GRASP + PR (Path Relinking):

Dans cet article [71], les auteurs ont utilisée une adaptation de l'algorithme GRASP pour résoudre le problème de clustering (formation de cluster) dans WSN. Nous ajoutons une phase d'intensification à l'algorithme GRASP. Ce l'intensification est basée sur la technique de Path Relinking qui combine la solution renvoyée par la recherche locale avec une bonne qualité solutions stockées dans un pool défini. L'algorithme proposé s'appelle GRASP+PR. L'algorithme a deux paramètres, max-it et α . max c'est le nombre d'itérations sans amélioration qui est adoptée comme condition d'arrêt de l'algorithme et le paramètre α est utilisé dans la recherche locale procédure. Au début de l'algorithme, un ensemble LC du vivant nœuds pouvant être chef de cluster est déterminé. Un nœud sera un candidat chef de cluster uniquement s'il a une énergie supérieure à une valeur estimée limite E_{min} . Pour estimer l'énergie consommée par un cluster head en un tour, nous avons considéré que les clusters ont le même quantité de nœuds, par conséquent, tous les chefs de cluster consomment le même quantité d'énergie, en changeant seulement leurs distances par rapport a la station de base.

Une solution du problème de clustering est représentée par deux vecteurs, CH et I. CH est de taille nch et contient le cluster nœuds principaux du tour en cours. Indices du vecteur I (de taille n) représentent les ID de nœud et les valeurs des cellules respectives sont leur identifiant de chef de cluster. Dans cette structure, pour un nœud qui est choisi comme chef de cluster, la valeur de la cellule respective est la sienne IDENTIFIANT. En utilisant une telle structure, nous pouvons affecter des nœuds membres aux têtes de grappes. La figure 4.6 montre un exemple de solution représentation avec $n = 10$ et $nch = 3$. Dans cet exemple nous supposons que tous les nœuds sont candidats pour être des chefs de cluster, c'est-à-dire $LC = \{1, 2, \dots, 10\}$.

<i>CH</i>	4	1	6							
<i>I</i>	1	1	6	4	1	6	1	6	1	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figure 4.6 : représentation de la solution.

Phase d'intensification Path Relinking

Dans ce travail, la technique du Path Relinking (PR) est utilisée pour rechercher de nouvelles solutions de bonne qualité. PR a été initialement propose par Glover [72] comme mécanisme pour combiner l'intensification et la diversification en explorant des trajectoires

reliant des solutions de haute qualité précédemment produites lors de la recherche. Le PR a besoin d'une paire de solutions, disons CH (solution d'origine) et CHg (solution de guidage), $CH \neq CHg$. La solution Cho est la solution renvoyée par la recherche locale et la solution de guidage CHg est une solution choisie au hasard dans un ensemble Pool d'élite solutions. La procédure PR commence par Cho et la transforme progressivement en l'autre solution CHg en insérant des nœuds de CHg –Cho et en supprimant des nœuds de Cho –CHg (c'est-à-dire un chemin qui relie Cho a CHg est génère par des mouvements de swap). Le nombre total d'étages réalisées (pour transformer CH en CHg) est $CHo - CHg$, qui est égal a $CHo - CHg$ (symétrique différence entre CH et CHg). A chaque étape, le " meilleur " solution obtenue est choisie. Des solutions moins similaires que la solution d'origine et plus similaire a celle du guide sont progressivement obtenues a chaque étape. La procédure de RP revient la meilleure solution obtenue sur le chemin de Cho a CHg.

Dans la figure 4.7 est montre un exemple dans lequel la solution de guidage est la fondation en trois étapes a partir de la solution d'origine. L'ensemble Pool de solutions d'élite stocke la plupart des solutions psized. Cet ensemble est mis a jour par la procédure addSolution Pool(CH), ou CH est une bonne solution obtenue a chaque itération de l'algorithme GRASP+PR. Cette procédure vérifie si l'élite l'ensemble est plein ($Pool = psize$), $CH \neq Pool$ et CH a mieux qualité que la pire solution d'élite dans la piscine. Si ces conditions sont satisfaites, alors la solution S est ajoutée a Pool, remplaçant une solution d'élite. Parmi toutes les solutions d'élite ayant pour objectif ne fonctionne pas mieux que celle de CH, la solution CH' la plus semblable a CH est sélectionne pour être retire de l'ensemble d'élite. La similitude entre deux solutions est déterminée par leur différence symétrique. Si l'ensemble élite n'est pas plein ($Pool < psize$), une solution CH est simplement ajoute a l'ensemble élite si $CH \neq Pool$.

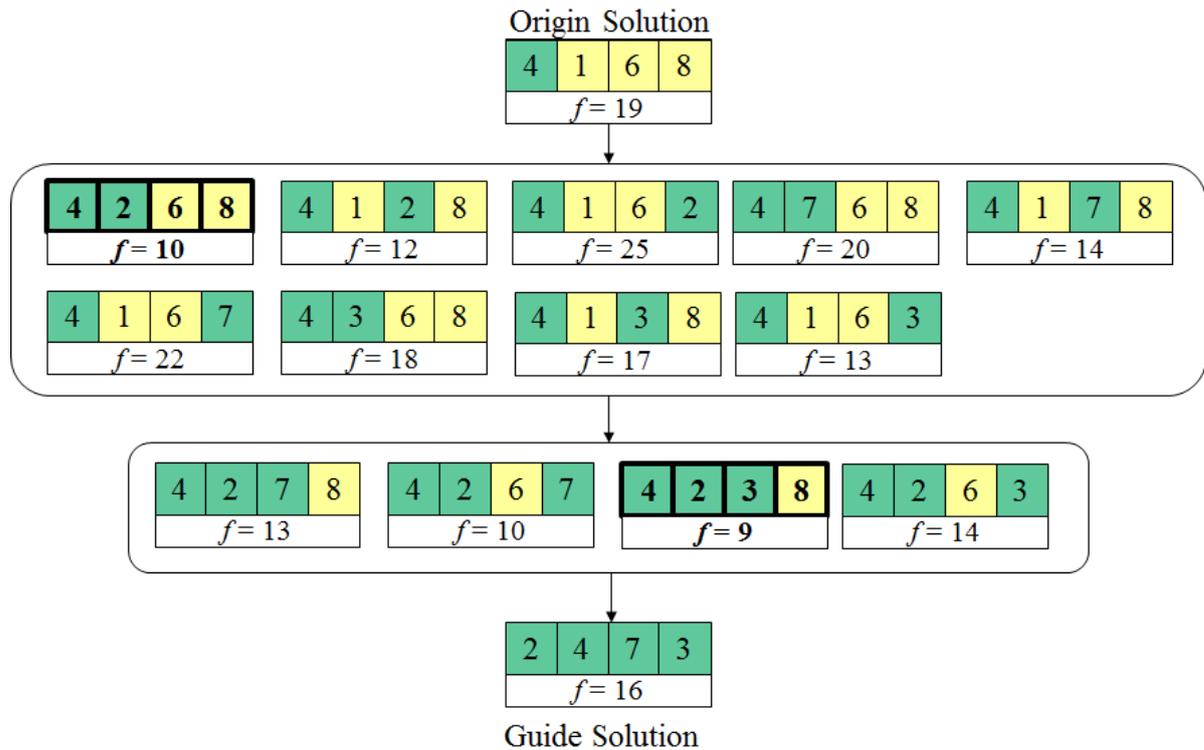


Figure 4.7: Phase d'intensification Path Relinking.

4.5.3 MIP (Mixed Integer Programming):

Dans cet article [73] Le problème de l'optimisation du WSN dans les réseaux multi-sauts a été largement abordé dans de nombreux articles de recherche. Parmi eux, différentes métriques de réseau telles que la latence et la durée de vie sont généralement utilisées comme paramètres principaux pour les critères d'optimisation. De plus, les modèles de programmation mixte en nombres entiers couvrent la majorité des évaluations grâce à sa précision dans la livraison des résultats.

Par exemple, dans [74], l'impact de la suppression des nœuds critiques sur la latence du réseau est analysé au moyen de un modèle MIP inséré dans un framework qui supprime itérativement les nœuds critiques les uns après les autres. La latence est calculée comme la somme globale du nombre de sauts nécessaires pour transmettre les données de chaque nœud jusqu'à la station de base. Puisque le problème est formulé et résolu à l'aide d'un modèle MIP, il est beaucoup de temps pour calculer les prélèvements simultanés. De ce fait, les auteurs ne calculent que l'impact des premier et deuxième nœuds les plus critiques dans des réseaux générés aléatoirement avec jusqu'à 100 capteurs répartis dans une zone en forme de disque de 200 m de rayon.

De même, la recherche dans [75] analyse le même impact en utilisant des données d'entrée et un système similaires. mise en page du modèle, mais en se concentrant sur la durée

de vie du réseau cette fois. Même si les modèles MIP sont très similaires, auteurs vont ici au-delà du seuil de [74] en calculant l'impact de jusqu'à cinq nœuds critiques dans réseaux de 50 capteurs avec deux techniques de suppression différentes : itérative et simultanée.

Dans ce cas, la durée de vie est définie comme le nombre d'intervalles de temps nécessaires jusqu'à ce que le premier nœud soit à court de batterie vie, en tenant compte du fait que chaque nœud transmet un paquet à chaque tranche de temps. De même, les auteurs étudier en profondeur le cas de l'élimination du nœud qui offre plus de dégradation du réseau en termes de latence. Les résultats montrent l'évolution de la dégradation du réseau à mesure que le rayon du réseau diminue ainsi que lorsque le nombre de nœuds varie. Une autre amélioration du modèle cité se trouve dans [76], où les auteurs fusionnent les deux métriques, latence et la durée de vie, et évaluer la dégradation du réseau en durée de vie lors de la limitation de l'ensemble nombre de sauts, c'est-à-dire en limitant la latence maximale. La taille des réseaux étudiés varie de 30 à jusqu'à 90 capteurs. Même si les modèles MIP sont très efficaces pour fournir des résultats exacts pour de nombreux critères d'optimisation, ils manquent d'évolutivité. Tous les travaux cités précédemment partagent la même structure WSN : peu de nœuds de réseau et, globalement, seuls le nœud le plus et les deux nœuds les plus critiques sont étudiés. Afin d'étendre de tels scénarios, les heuristiques offrent une bonne opportunité d'obtenir près de des résultats optimaux dans des situations plus vastes, tant en termes de densité de réseau que de nombre de nœuds critiques.

Dans ce travail, ils essaient de couvrir cet espace littéraire qui n'offre pas encore de résultats pertinents en présentant une méta-heuristique GRASP pour les réseaux jusqu'à 1000 nœuds dans une zone de rayon 630. Ces valeurs ne sont pas arbitraire mais mis à l'échelle à partir du scénario de base de 100 nœuds et de 200 rayons de réseau présenté dans le littérature précitée.

4.5.6 Comparaison entre les travaux liés

Le tableau ci-dessous indique une représentation de la comparaison entre travaux liés.

Tableau 4. 1: Comparaison entre les travaux liés.

Travaux Paramètres	GRASP	GRASP+PR	MIP
Vecteur de Solution	Composé des nœuds voisins des CHs	Composé des nœuds CHs	Composé des nœuds voisins sauf des nœuds crucial
déroulent des opérations	Deux phases: la phase constructive et la phase de recherché locale	La phase de recherché locale	Deux phases: la phase constructive et la Phase d'amélioration.
Fonction de fitness	Durée de vie, Distance moyenne inter-cluster	Durée de vie, Distance moyenne inter-cluster	Durée de vie, Energie résiduelle, Moyenne des nœuds
Critère d'arrêt	Temps ou le nombre d'itérations	Temps ou le nombre d'itérations	Nombre d'itérations
Critère de sélection des CHs	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire
Nature du Réseau	Hétérogène	Hétérogène	Homogène
Outil utilise	C++	C++	C++
Comparaison avec	GRASP+PR, LEACH, MIP	GRASP, LEACH,	GRASP

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploré une technique d'optimisation qui nous a permis de proposer notre protocole de routage basé sur l'heuristique de GRASP dont l'objectif principal est le prolongement de la durée de vie du RCSFs ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique. L'architecture, le déroulement, l'implémentation et la simulation de notre technique proposée vont être présentés dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 5

Contribution & Implémentation

Sommaire :

5.1 Introduction

5.2 Architecture de la contribution proposée

5.3 Implémentation

5.4 Modèle d'énergie

5.5 Résultats & Analyse

5.6 Conclusion

5.1 Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre notre contribution proposée, la partie implémentation de ce travail et les simulations effectuées permettent d'évaluer les performances de notre contribution en termes d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil.

5.2 Architecture de la contribution proposée

Dans notre protocole IEE-GRASP (Improved Energy Efficiency by GRASP) on va adapter l'algorithme GRASP pour améliorer l'efficacité d'énergie dans le RCSF. Notre technique possède trois phases : une phase d'initialisation, une phase de construction et phase de recherche locale.

5.2.1 Phase d'initialisation

Dans cette phase la distance entre la station de base et tous les nœuds a été calculé. La distance euclidienne a été utilisée pour calculer les distances:

$$\text{Distance} = \{ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \} \quad \dots\dots \text{éq}(5.1)$$

5.2.1.1 Organigramme de la Phase d'initialisation

l'organigramme suivant illustrée les étapes de la phase d'initialisation de notre protocole

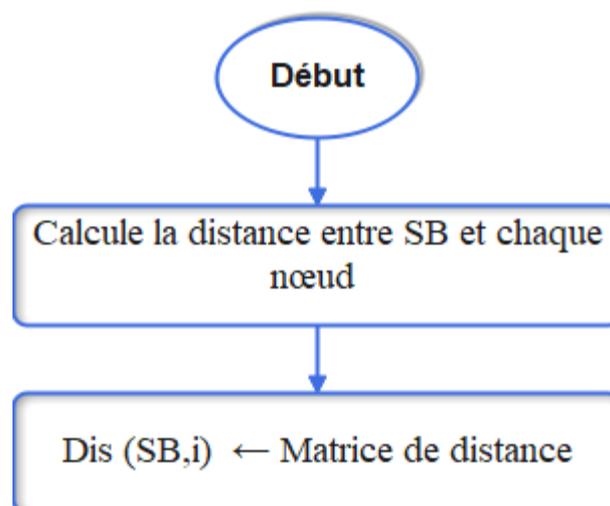


Figure 5. 1 Organigramme de la phase d'initialisation.

5.2.1.2 Algorithme détaillé de la Phase d'initialisation

L'algorithme détaillé pour l'initialisation est donne dans la figure suivante:

Entrée

N : nombre de tous les nœuds;

B_x, B_y : coordonnées de station de base;

Node $i.x$, Node $i.y$: coordonnées de tous les nœuds;

Début

Pour i de 1 jusqu'à N

$Dis(SB, i) \leftarrow \{\sqrt{(B_x - x_i)^2 + (B_y - y_i)^2}\}$ */Calcul la distance entre chaque nœud et station de base

Fin pour;

Fin**Sortie**

$Dis(SB, i)$: matrice de distance

Figure 5. 2: Algorithme de la phase d'initialisation.

5.2.2 phase de construction

Dans cette phase après que le nœud le plus éloigné de la SB ait été identifié, une solution viable a été créée de manière itérative, un élément à la fois. La méthode de localisation des sites adjacents à l'aide de stratégies constructives DOWN et UP a été sélectionnée au hasard à l'aide d'un filtre présélectionné (RCL) au lieu du filtre complet.

Soit $Coste_i$ le nombre de voisins du nœud i qui n'appartiennent pas vraiment à la solution courante. C_{max} et C_{min} indiquent respectivement le score $Coste_i$ maximum et minimum parmi tous les candidats. Soit $\alpha \in [0,1]$ le paramètre RCL qui contrôle la cupidité de sélection. Le choix est basé sur RCL. Contient des candidats pour la condition $Coste_i$. Le candidat est ensuite sélectionné au hasard dans le RCL. Lorsque $\alpha = 1$ la sélection est gourmande et on recherche les deux candidats ayant le plus grand nombre de voisins. Lorsque $\alpha = 0$, tous les candidats sont sélectionnés au hasard. Pour notre problème (problème de minimisation), le RCL est généré comme suit :

$$RCL \leftarrow i \in C \text{ } Coste_i \leq C_{min} + \alpha(C_{max} - C_{min})$$

.....éq(5.2)

où C_{\min} et C_{\max} représentent respectivement les coûts énergétiques des nœuds inférieur et supérieur, est un nombre réel choisi au hasard dans la période $[0, 1]$. Les nœuds RLC sont disposés par ordre décroissant de puissance.

Après avoir construit la RCL, nous prenons aléatoirement un élément et l'incorporons dans la solution en cours de construction - c'est l'aspect aléatoire de GRASP. Ensuite, nous mettons à jour l'ensemble des candidats (C), les coûts incrémentaux des éléments (C) et le RCL, qui est l'aspect adaptatif de l'algorithme. La construction se poursuit ainsi jusqu'à l'obtention d'une solution complète. L'organigramme pour la construction est donné sous la forme suivante :

5.2.2.1 Organigramme de la Phase de Construction

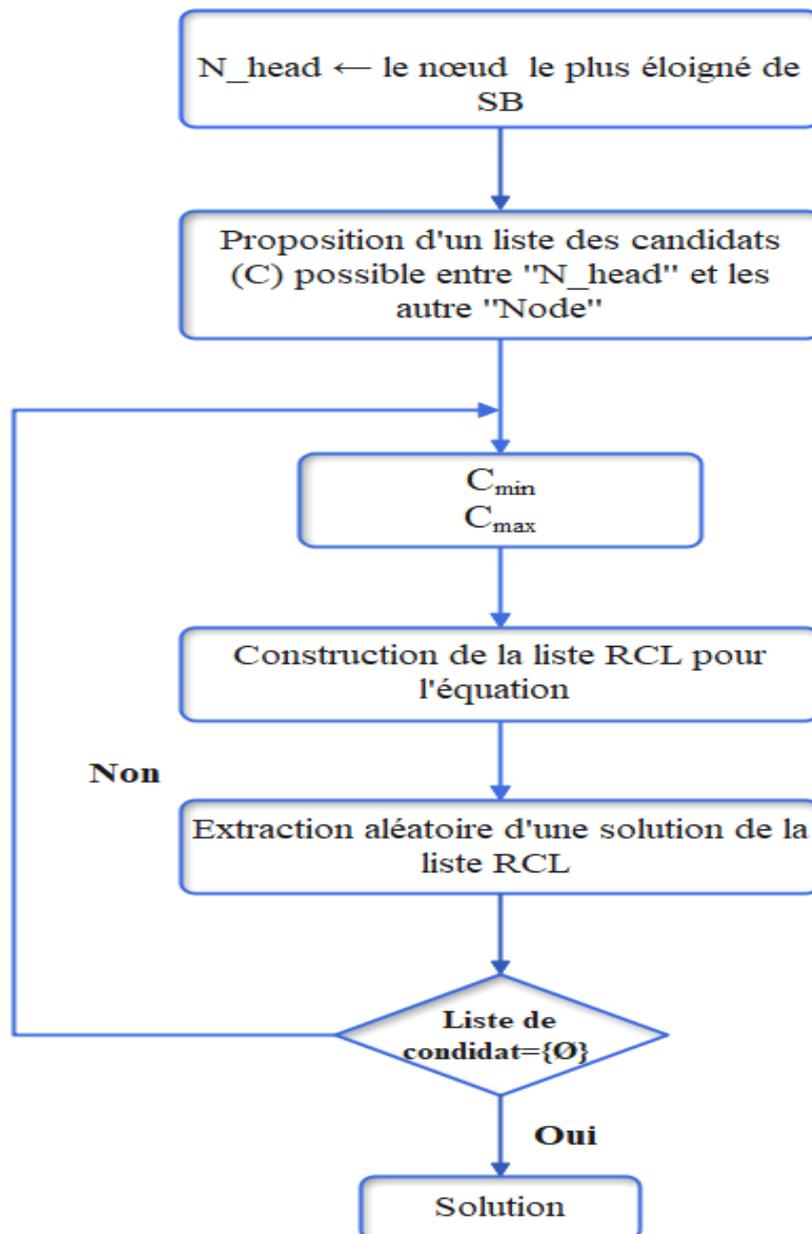


Figure 5. 3: Organigramme de la phase de construction.

5.2.2.2 Algorithme détaillé de la Phase de Construction

L'algorithme détaillé pour la construction est donne dans la figure suivante:

Entrée

$Dis (SB,i)$: matrice de distance;

$S \leftarrow \emptyset$

Début

$[Max-dist, Max_num] = \max (Dis (SB,i));$

$N_head \leftarrow Max_num;$

Pour i de 1 jusqu'à N_num

Pour j de 1 jusqu'à N_num

$E(i, j) : \{ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} / j \neq i \}$ */calcule la distance entre tous les nœuds

(la Coste)

Fin pour;

Fin pour;

$C \leftarrow E$

Tan que $C \neq \emptyset$

$C_{min} \leftarrow \min(E);$

$C_{max} \leftarrow \max(E);$

$RCL \leftarrow \emptyset$

Si $Coste_i \leq C_{min} + \alpha(C_{max} - C_{min})$

$RCL \leftarrow Coste_i$

Fin si;

$S \leftarrow$ sélection aléatoire de $RCL;$

Mise à jour de C

Fin tanque;

Return S

Fin**Sortie**

$S \leftarrow$ solution non optimal

Figure 5. 4: Algorithme de la phase de construction .

5.2.3 Phase de recherche locale

L'itinéraire construit par l'étape précédente n'est pas nécessairement optimale. en raison de cela, GRASP effectue une recherche locale sur l'itinéraire obtenu à l'étape précédente afin de l'améliorer. la recherche locale est effectuée de manière itérative; il remplacera la solution actuelle par une meilleure solution dans le voisinage à l'aide de la stratégie;

- ❖ **La meilleure amélioration** : nous vérifions tous les voisins, remplaçons la solution par le meilleur voisin.
- ❖ **Première optimisation** : nous remplaçons la solution initiale par le premier meilleur voisin que nous trouvons.

5.2.3.1 Organigramme de la Phase de recherche locale

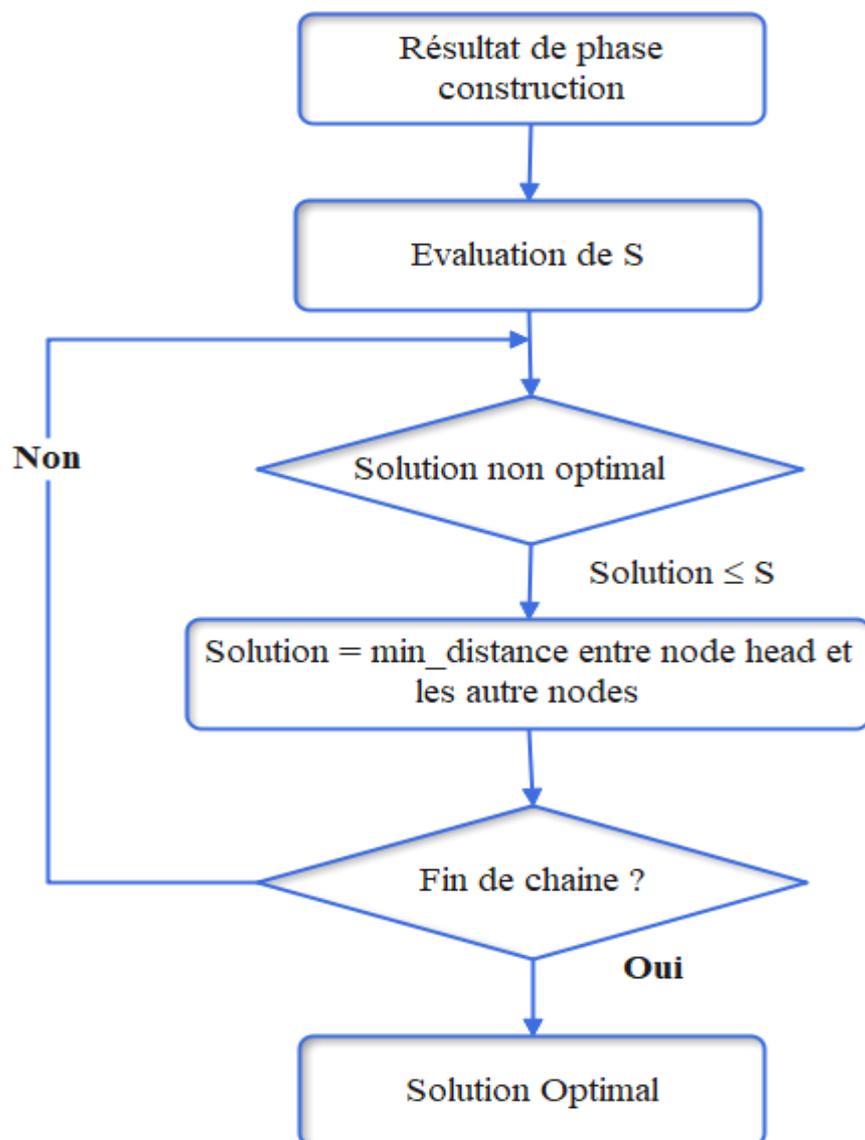


Figure 5. 5: Organigramme de la phase de recherche local.

5.2.3.2 Algorithme détaillé de la phase de recherche locale

L'algorithme détaillé pour la recherche locale est donné dans la figure suivante:

Entrée

$S \leftarrow$ solution non optimal */ $\{(N_{head}, N_i), (N_{i+2}, N_{i+2}), \dots, (N_{n-1}, N_n)\}$

$S' \leftarrow \emptyset$

Début

$Node.already =$ Linspace $(0,0,Node_Num)$ */matrice qui initialiser par 1 le nœud déjà passé par la chaîne

$Now_node \leftarrow N_{head}$

Tant que $(Node.already(i))_{i \leftarrow 1 \leftarrow N} <> 1$ */ condition pour vérifier que tous les nœuds qui ne sont pas passés par la chaîne

$Matrice_dist =$ Linspace $(0,0, Node_Num)$

Pour $i=1$ jusqu'à $Node_Num$ faire

Si $Node.already(i) <> 1$

$Distance_{Now_node} \leftarrow \sqrt{(x_{Now_node} - x_i)^2 + (y_{Now_node} - y_i)^2}$ $i \neq Now_node$

Fin si

Fin pour

$[Min_dist, Min_num] = \min (Distance_{Now_node})$

S' : Mise à jour la solution optimale */ ajouter le nœud Min_num

$Node.already (min_num) = 1$

$Now_node \leftarrow Min_num$

Fin Tant que

Fin**Sortie**

$S' \leftarrow$ solution optimale

Figure 5. 6: Algorithme de la phase de recherche locale.

5.3 Implémentation

5.3.1 Choix du langage de programmation

Le langage de programmation utilisé pour l'implémentation est MATLAB R2018a. MATLAB (Matrix Laboratory) est un langage de programmation de quatrième génération, développé à l'origine pour le calcul matriciel par la société The MathWorks, il est utilisé à des fins de calcul numérique et visualisation graphique. MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Il peut s'utiliser seul ou bien avec des boîtes à outils additionnelles conçues pour répondre à de nombreux besoins spécifiques aux ingénieurs et aux scientifiques.

Les caractéristiques de la machine utilisée dans la simulation sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 5.1: Caractéristiques matérielles

Hardware	Caractéristiques
Processeur	Core i3 CPU 1.80 GHz
Mémoire (RAM)	4.00 GO
Système d'exploitation	Microsoft Windows10 64 bits

5.3.2 Description de l'interface de simulation

Le simulateur se constitue de trois parties principales : partie de paramètres de simulation à gauche, partie de zone de simulation au milieu et la partie de résultats de simulation à droite.

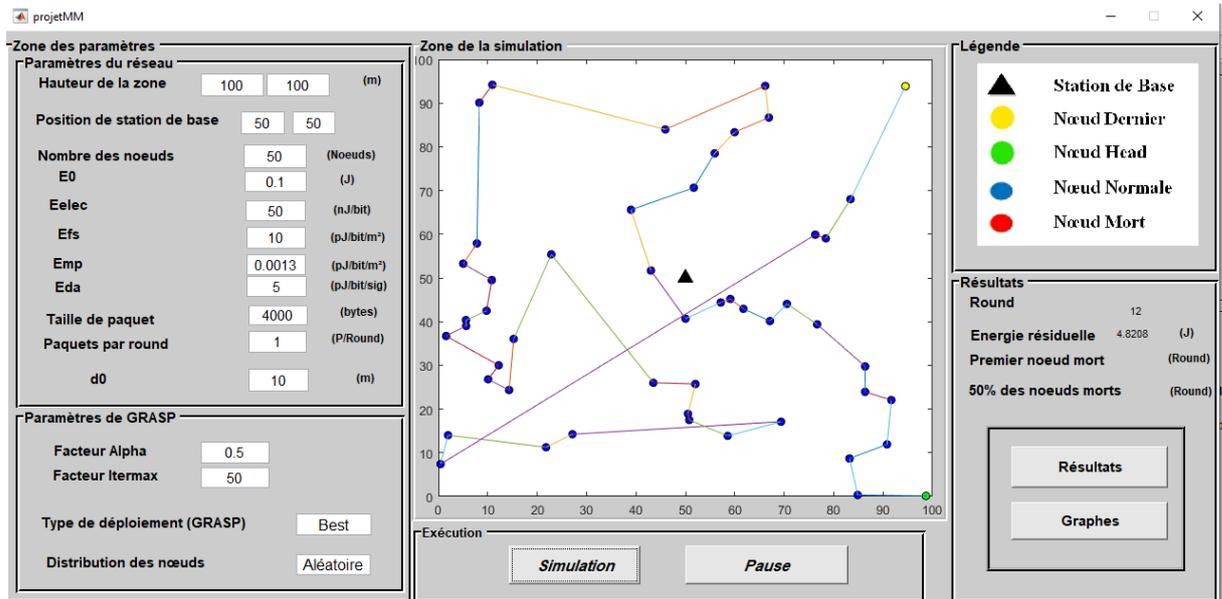


Figure 5.7 : Interface de notre application.

a) Partie de paramètres de simulation

Cette interface permet à l'utilisateur de saisir tous les paramètres de simulation, elle est divisé en deux partie : la première partie est réservée aux paramètres du réseau qui sont : les dimensions de la zone de simulation, la position de SB, le nombre des nœuds à distribuer dans la zone, les paramètres de modèle d'énergies choisi dans cet étude (l'énergie initiale E_0 , E_{elec} , E_{fs} , E_{mp} , E_{da}), la taille de paquet et le nombre de paquets à transmettre par une seule itération.

La deuxième partie est réservée aux paramètres d'algorithme de GRASP qui sont : le paramètre alpha et nombre itermax.

b) Zone de simulation

Cette zone contient trois parties :

- ❖ La première partie représente la zone de simulation.

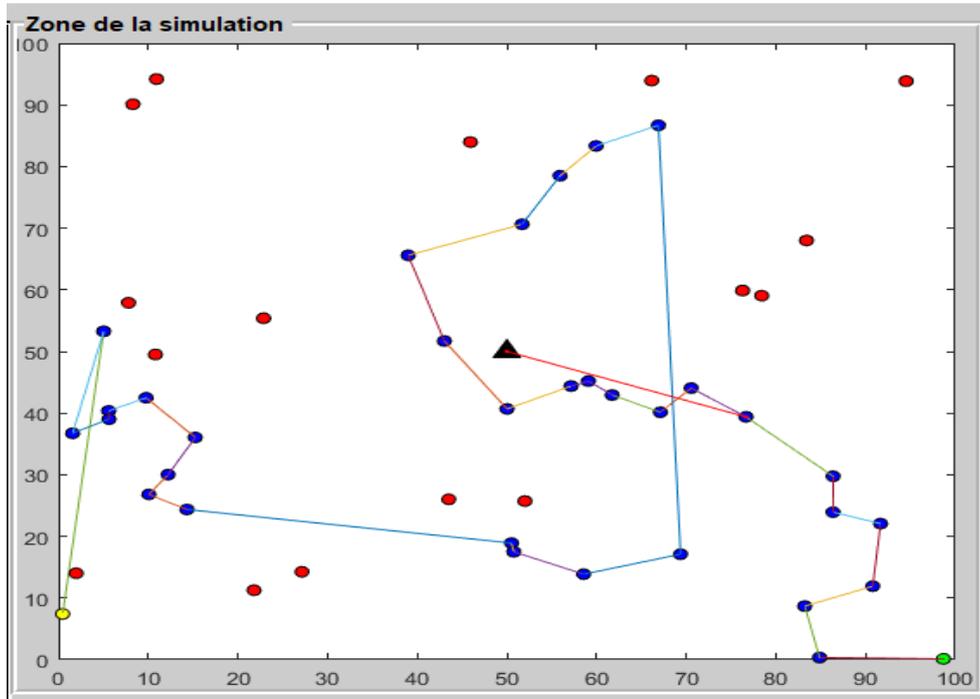


Figure 5.8 : Zone de simulation.

❖ La deuxième partie représente la légende qui représente les composantes de la première partie :

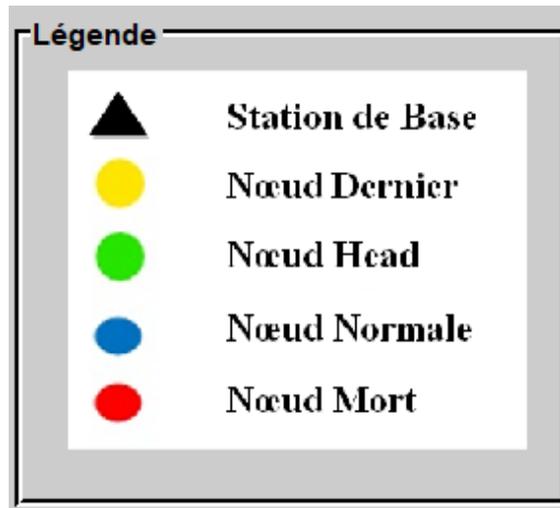


Figure 5.9 : Légende.

❖ La troisième partie se compose d'un bouton "Simulation" pour lancer la simulation et un bouton "Pause" pour mettre en pauser ou reprend la simulation.



Figure 5.10 : Simulation.

c) Partie de résultats de simulation

Cette partie se compose de :

- ❖ Résultats courants de la simulation : l'itération courante (Round), premier nœud mort, 50 % des nœuds morts, dernier nœud mort (dernier itération), l'énergie résiduelle.
- ❖ Un bouton "Résultats" qui sert à résumer les résultats sous forme d'un fichier Excel.
- ❖ Un bouton "Graphes" qui sert à résumer les résultats sous forme des graphes.

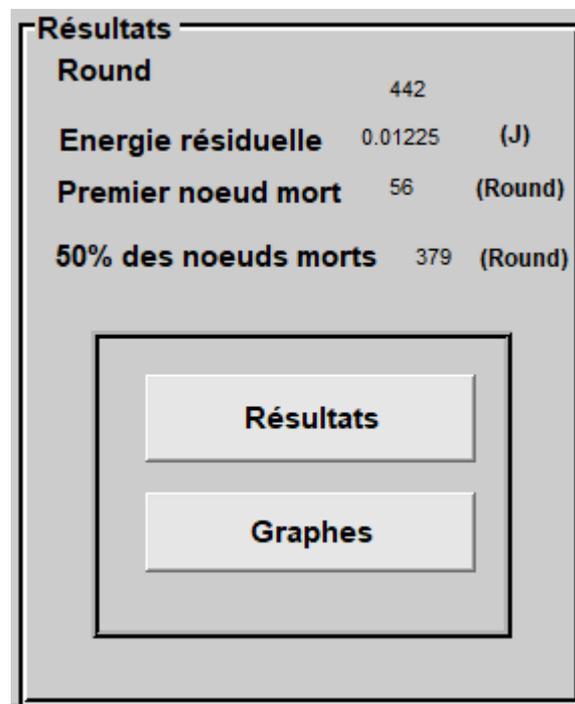


Figure 5.11 : Résultats de simulation.

5.4 Modèle d'énergie

Dans ce travail, le modèle énergétique des capteurs est adopté Sur le modèle de radio de première classe tel qu'utilisé dans [77] et [78]. Dans ce modèle, les capteurs dissipent de l'énergie pour transmettre, recevoir et collecter des messages. L'émetteur dissipe l'énergie à l'aide de la radio et du haut-parleur. Il effectue la réception de l'énergie dispersée uniquement à l'aide de la radio, comme le montre la **figure 5.12**. La radio peut contrôler la puissance d'émission pour n'utiliser que la puissance nécessaire pour atteindre le nœud prévu.

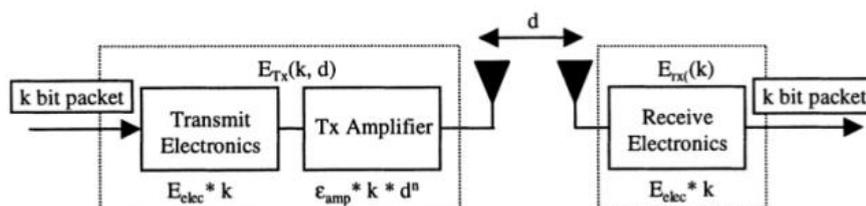


Figure 5.12 : Modèle de dissipation de l'énergie .

En utilisant l'électronique radio, consomme $E_{elec} = 50nJ/bit$ et l'amplificateur consomme $\epsilon_{mp} = 10pJ/bit/m^2$. Transmettre un message de k bits à une distance d ($E_{TX}(L, d)$) et de recevoir un message de k bits ($E_{RX}(L)$) la radio dépense respectivement les énergies suivantes:

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L * E_{elec}(L, d) + L * \epsilon_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ L * E_{elec}(L, d) + L * \epsilon_{mp} * d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \dots\dots \text{éq}(5.3)$$

- ❖ E_{elec} : L'énergie suffisante pour transmettre ou recevoir un seul bit.
- ❖ ϵ_{fs} : Facteur de l'amplification correspond au modèle « free space channel ».
- ❖ ϵ_{mp} : Facteur de l'amplification correspond au modèle « multipath fading channel ».
- ❖ E_{da} : L'énergie d'agrégation de donnée.
- ❖ L : La taille d'un message.
- ❖ d : La distance entre l'émetteur et le récepteur.
- ❖ d_0 : La distance limite pour laquelle les facteurs d'amplification changent de valeur.

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \dots\dots \text{éq}(5.4)$$

Pour recevoir un message de L bits, le récepteur consomme :

$$E_{RX}(L) = L * E_{elec} \dots\dots \text{éq}(5.5)$$

5.5 Résultats & Analyse

5.5.1 Résultats

Pour évaluer les performances de notre protocole (IEE-GRASP), nous avons procédé une comparaison avec le protocole de routage LEACH [61].

Le tableau présenté ci-dessous résume les résultats de plusieurs simulations (20 fois) effectuées sur notre protocole (IEE-GRASP) :

Tableau 5.2: Résultats de simulations.

Notre technique	Premier nœud mort (itération)	50% de nœud Morts (itération)	Dernier Nœud morts (itération)
Simulation 1	110	386	437
Simulation 2	198	399	435
Simulation 3	115	388	430
Simulation 4	47	378	431
Simulation 5	74	381	434
Simulation 6	69	370	427
Simulation 7	77	381	443
Simulation 8	110	385	437
Simulation 9	200	399	435
Simulation10	115	388	431
Simulation 11	182	369	438
Simulation 12	72	382	426
Simulation 13	113	407	455
Simulation 14	87	375	430
Simulation 15	78	375	439
Simulation 16	157	391	442
Simulation 17	66	390	439
Simulation 18	56	368	430
Simulation 19	61	378	432
Simulation 20	237	398	435
Moyen	111	384	435

a) *Durée de vie de réseau*

La figure 5.13 représente la comparaison entre les deux protocoles en termes de la durée de vie du réseau (Premier nœud mort, 50 % des nœuds morts et dernier nœud mort).

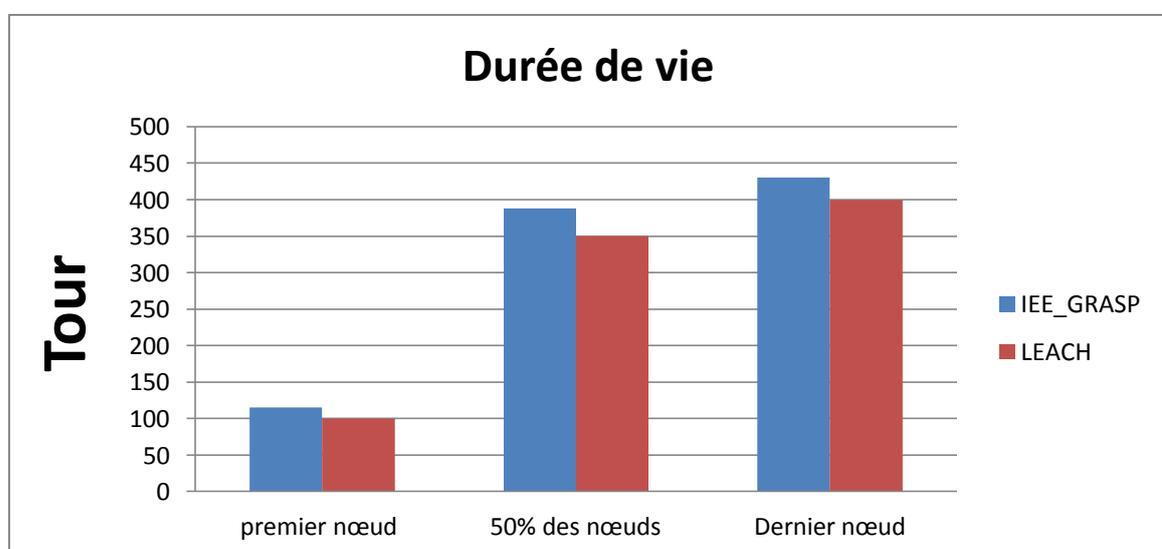


Figure 5.13: Comparaison en termes de la durée de vie.

b) Nombre des nœuds morts et nœuds vivants

La figure 5.14 représente la comparaison entre notre protocole IEE-GRASP et le protocole LEACH en termes de nombre des nœuds morts par itération.

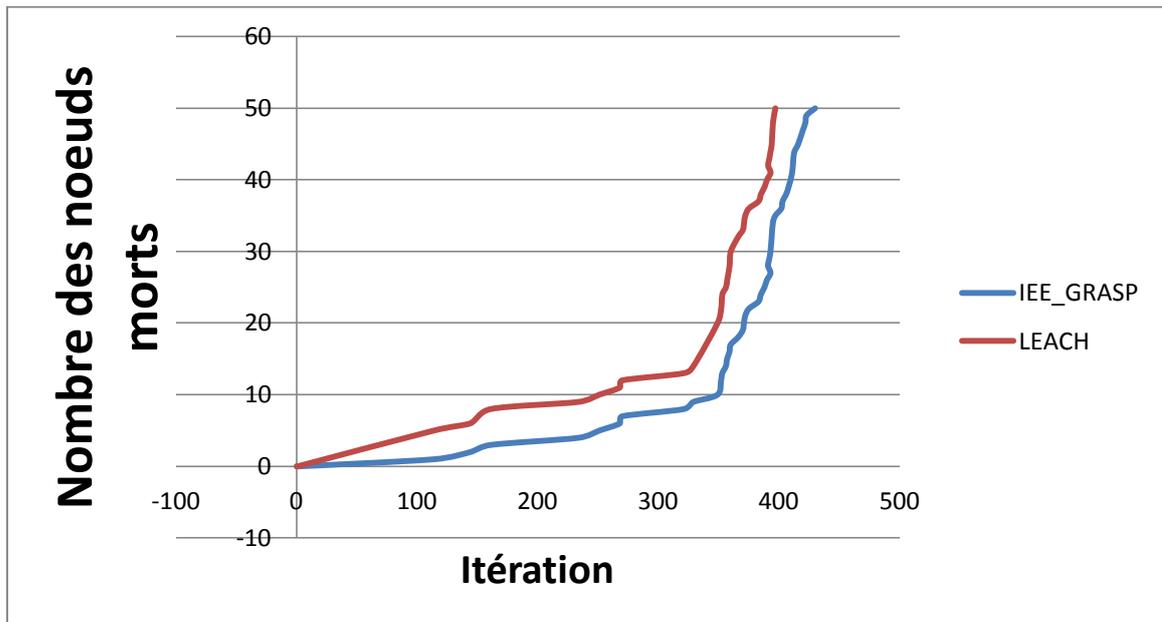


Figure 5.14: Comparaison en termes de nombre des nœuds morts par tour.

La figure 5.15 représente la comparaison entre les deux protocoles en termes de nombre des nœuds vivants par tour.

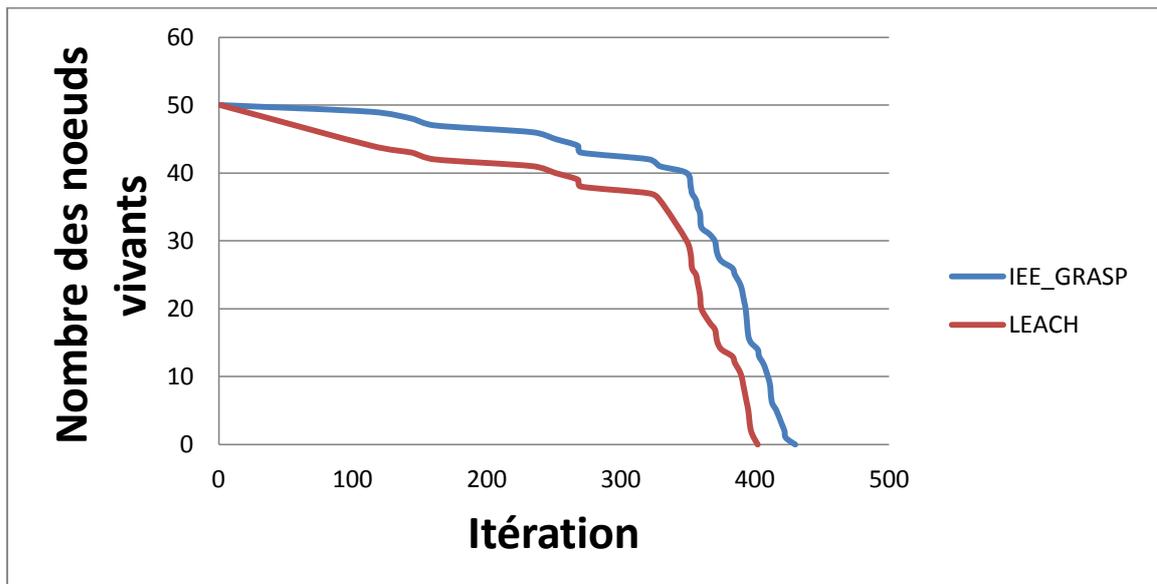


Figure 5.15: Comparaison en termes de nombre des nœuds vivants par tour.

c) *Energie résiduelle*

La figure 5.16 représente la comparaison entre les protocoles en termes de l' énergie résiduelle par tour.

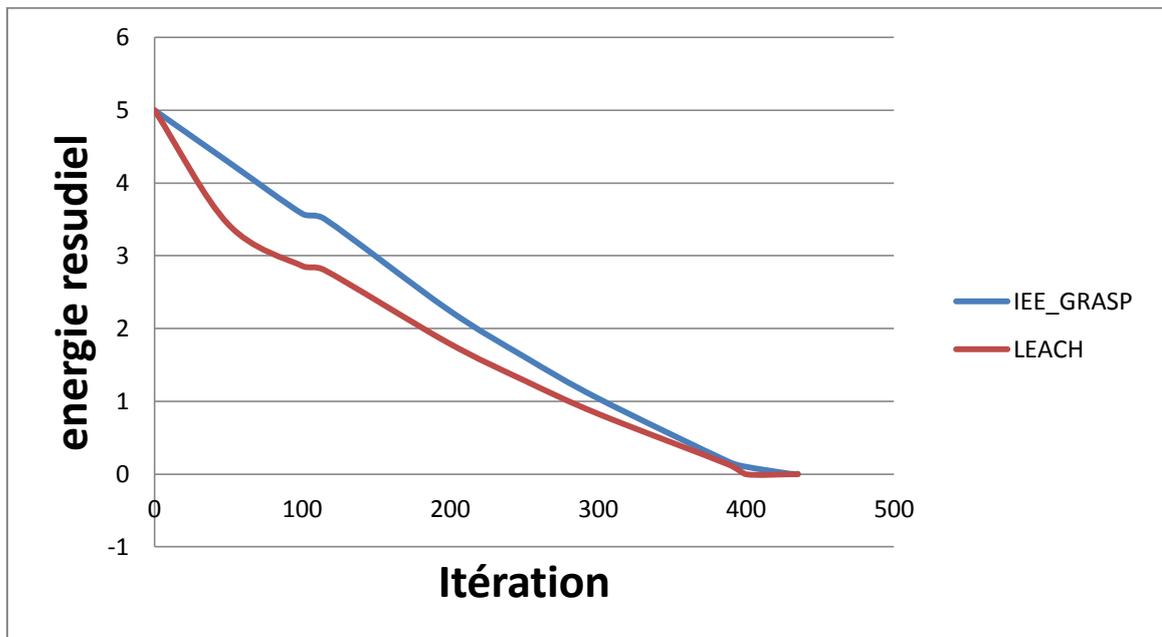


Figure 5.16: Comparaison en termes de l'énergie résiduelle.

5.5.2 Analyse des résultants

Nous déduisons d'après les résultats de simulation que notre protocole surpasse par 25% le protocole LEACH en termes de durée de vie , en termes de consommation d'énergie et l'efficacité énergétique dans chaque itération, cela dû aux algorithmes utilisées dans les trois phases de notre protocole.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons implémenté notre protocole de routage proposé (IEE-GRASP) basé sur la méthode GRASP, pour prolonger la durée de vie de réseau et minimiser la consommation d'énergie et améliorer l'efficacité énergétique de réseau. Les résultats de la simulation démontrent que notre protocole de routage (IEE-GRASP) minimise la dissipation d'énergie et prolonge la durée de vie du réseau par rapport le protocole LEACH, on note aussi que la durée de vie du réseau obtenue avec notre protocole supérieure de celle fournie avec le protocole LEACH dans le cas que nombre de nœud augmente.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Le succès des réseaux de capteurs sans fil dépend de la simplicité des nœuds capteurs (faible puissance de calcul, petite batterie, antenne radio à portée limitée, etc.). Cependant, lorsque ces capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles ou même sur de grandes surfaces, c'est-à-dire lorsqu'il est difficile voire impossible de remplacer les batteries des nœuds lorsqu'elles sont épuisées, la consommation électrique devient un problème primordial. Par conséquent, la durée de vie limitée des nœuds aura un impact sur la durée de vie de l'ensemble du réseau. Ainsi, cela aura des conséquences négatives sur la connectivité et la couverture du réseau.

En effet, plusieurs protocoles de routage ont été proposés dans la littérature afin d'améliorer les performances des RCSF et répondre aux besoins des applications considérées.

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés au routage hiérarchique de type chaîne et nous avons fait une adaptation de l'algorithme GRASP, visant à résoudre le problème d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil avec la possibilité de réduire leur consommation. Nous avons proposé des solutions pour mieux prendre en compte les ressources énergétiques du réseau, dans le but de prolonger sa durée de vie. Au cours de nos travaux sur ce mémoire, nous avons implémenté et simulé le fonctionnement de notre protocole d'amélioration proposé IEE-GRASP et l'avons comparé avec le protocole LEACH afin de démontrer sa performance en termes de consommation d'énergie pour les RCSFs. Les simulations ont donné de bons résultats, et nous avons enregistré de ce fait une très faible consommation d'énergie, et une extension significative de la durée de vie de réseau.

Perspectives

Comme travaux futurs, nous proposerons d'appliquer un nouveau algorithme au lieu d'un algorithme glouton pour construire les chaînes afin d'éviter les longues distances de communication entre deux capteurs. De plus, la sélection du leader en fonction d'autres facteurs peut améliorer la durée de vie du réseau.

Bibliographie

Références :

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankara Subramaniam, and E. Cayirci , “A Survey on Sensor Networks”. IEEE Communications Magazine, August 2002.
- [2] David Martins, Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil Stéganographie et réseaux de confiance, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2010.
- [3] https://www.researchgate.net/figure/The-architecture-of-Contiki-OS_fig7_284355315
- [4] Tinyos. <http://www.tinyos.net/>, 2010
- [5] Dunkels, A., B. Grönvall, et T. Voigt. Contiki: a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors. In Proceedings of the First IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, pages 455-462, Tampa, Florida, USA, 2004.
- [6] <https://www.slideshare.net/snecute/tinyos>
- [7] Silicon Labs, « The Evolution of Wireless Sensor Networks ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf>. [Consulté le: 05-juill-2014].
- [8] Q. Wang et I. Balasingham, « Wireless Sensor Networks - An Introduction », in Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design, Y. K. Tan, Éd. InTech, 2010.
- [9] G. Xu, W. Shen, et X. Wang, « Applications of Wireless Sensor Networks in Marine Environment Monitoring: A Survey », Sensors, vol. 14, no 9, p. 16932-16954, sept. 2014.
- [10] Mr. Clément SAAD, « Quelques contributions dans les réseaux de capteurs sans fil: Localisation et Routage », thèse pour obtenir un diplôme de DOCTORAT, l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse ,2009.
- [11] Bounegta Nadia, « Approche Décentralisée pour la sécurité d'un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF)», Mémoire de Fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique, l'Université de Bechar, juin 2010.
- [12] Mr. fares Abdelfattah, « Développement d'une bibliothèque de capteur sans fil », diplôme de master en informatique, université Montpellier 2, avril 2008.
- [13] Badaoui Abdellatif & Mostefaoui Med Amine « Acquisition de données à distance dans les réseaux de capteurs sans fil » Mémoire Master 2013 Université de Tlemcen
- [14] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati «Wireless Sensor Networks : Technology, Protocols, and Application » ISBN 978-0-471-74300-2 , pp 20-22
- [15] GUETTAF Dihia, HADJAL Lydia, "Amélioration et simulation du protocole",2015

- [16] MOHAMED RAMDANI. "Problèmes de sécurité dans les réseaux de capteurs avec prise en charge de l'énergie." Mémoire de Magister en Informatique, Université SAAD DAHLAB DE BLIDA, Novembre 2013.
- [17] YACINE. YOUNES . "Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs." Mémoire de Magister en Informatique, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2012.
- [18] LYES. KHELLADI et NAJIB. BADACHE. " Les réseaux de capteurs: état de l'art." Rapport de recherche, Université USTHB, Alger, Février 2004.
- [19] S. K. Singh, M. P. Singh, D. K. Singh, "Applications, Classifications, and Selections of Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks", International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, Vol. 1, No. 2, pp. 85-95,2010
- [20] Thèse r Ali MAKKE pour obtenir le grade de docteur de l'Université Paris Descartes Spécialité: Informatique et Réseaux Détection d'attaques dans un système WBAN de surveillance médicale à distance.
- [21] Sari Mounya Amal<< Etude Du Rssi Pour L'estimation De La Distance Dans Les Réseaux De Capteurs Sans Fil>> Mémoire De Master 2017 Université Abou Bakrbelkaid–Tlemcen
- [22] S. Rath B-P-S. Sahoo and D. Puthal. "Energy Efficient Protocols for Wireless Sensor Networks : A Survey and approach". International Journal of Computer Applications, Vol.44, pp.43-48, 2012.
- [23] P. Patil J-N. Dehankar and G. Agarwal. "Survey on Energy Consumption in Wireless Sensor Network". International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), Vol.2, pp.1-4, 2013.
- [24] B. Baranidharan and B. Shanthi. "A Survey on Energy Efficient Protocols for Wireless Sensor Networks". International Journal of Computer Applications, Vol.11, pp.35-40, 2010.
- [25] K. Holger and A. Willig. "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks". Jhon Wiley and Sons Ltd, 2005.
- [26] J-H. Chang and L. Tassiulas. "Energy Concerving routing inWireless Ad-hoc Network". In Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Coputer and Commnications Societies, pp.22-31, 2000.
- [27] A. Giridhar and P-R. Kumar. "Mximizing the Functional Lifetime of Sensor Networks". In Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp.5-12, 2005.

- [28] D. Kofman-R. Mazumdar V-P. Mahatre, C. Rosenberg and N. Shroff. "A Minimum Cost Heterogeneous Sensor Network with a Lifetime Constraint". IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.4, pp.4-15, 2005.
- [29] V. Srinivasan W. Wang and K-C. Chua. "Using Mobile Relays to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks". In Proceedings of the 11th Annual international conference on Mobile Computing and Networking, pp.270-283, 2005.
- [30] A. Cerpa and D. Estrin. "ASCENT : Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies". IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.3, pp.272-285, 2004.
- [31] W-B. Heinzelman J. Deng, Y-S. Han and P-K. Varshney. "Scheduling Sleeping Nodes in Righ Density Cluster-based Sensor Networks". Mobile Networks and Applications, Vol.10, pp.825-835, 2005.
- [32] K. Helman and M. Colagrosso. "Investigating a Wireless Sensor Network Optimal Lifetime Solution for Linear Topologies". Journal of Interconnection Networks, Vol.7, pp.91 99, 2006.
- [33] D. Tian and N-D. Georganas. "A coverage-preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Networks". In Proceedings of the 1st A CM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, pp.32-41, 2002.
- [34] H. Jaleel and M. Egerstedt, «Sleep Scheduling of Wireless Sensor Networks Using Hardcore Point Processes», American Control Conference (ACC) Washington, DC, USA, June 2013.
- [35] Rabah Meraihi, « Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc >>, thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2005.
- [36] D.S. Deif and Y. Gadallah. Classification of wireless sensor networks deployment techniques. IEEE Communications Surveys Tutorials, 16(2) :834–855, Second 2014.
- [37] Deepak Ganesan, Alberto Cerpa, Wei Ye, Yan Yu, Jerry Zhao, and Deborah Estrin. Networking issues in wireless sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, 64(7) :799 – 814, 2004. Computing and Communication in Distributed Sensor Networks.
- [38] Trevor Armstrong. Wake-up based power management in multi-hop wireless networks, 2005. Term Survey Paper, University of Toronto, available at <http://www.eecg.toronto.edu/trevor/Wakeup/index.html>.
- [39] Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, and Mani B. Srivastava. STEM : Topology management for energy e_cient sensor networks. In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, volume 3, pages 78_89, Big Sky, Montana, USA, 2002.

- [40] Rong Zheng, Jennifer C. Hou, and Lui Sha. Asynchronous wakeup for ad hoc networks. In Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad Hoc networking & computing (MobiHoc'03), pages 35_45, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [41] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, and Fatih Alagoz. MAC protocols for wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Magazine*, 44(4) :115_121, April 2006.
- [42] Koen Langendoen. Medium access control in wireless sensor networks. In Hongyi Wu and Yi Pan, editors, *Medium Access Control in Wireless Networks*, pages 535_560. Nova Science Publishers, May 2008.
- [43] 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) :493_506, 2004.
- [44] Jaap C. Haartsen. The bluetooth radio system. *IEEE Personal Communications*, 7(1) :28_36, February 2000.
- [45] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00), volume 2, pages 3005_3014, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [46] Khaled A. Arisha, Moustafa A. Youssef, and Mohamed F. Younis. Energy-Aware TDMA-based MAC for Sensor Networks. In Proceedings of the IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications, Computing and Networking (IMPACCT'02), New York City, NY, 2002.
- [47] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min, and Mihail L. Sichitiu. Z-MAC : a hybrid MAC for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(3) :511_524, 2008.
- [48] Mehmet C. Vuran, Özgür B. Akan, and Ian F. Akyildiz. Spatio-temporal correlation : theory and applications for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 45(3) :245_259, 2004.
- [49] Caimu Tang and Cauligi S. Raghavendra. Compression techniques for wireless sensor networks. *Wireless Sensor Networks*, pages 207_231, 2004.
- [50] 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 1_6, Pisa, Italy, October 2007.

- [51] Vijay Raghunathan, Saurabh Ganeriwal, and Mani Srivastava. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 44(4) :108_114, April 2006.
- [52] Ian F. Akyildiz, Tommaso Melodia, and Kaushik R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 51(4) :921_960, 2007.
- [53] Geoffrey Werner-Allen, Konrad Lorincz, Matt Welsh, Omar Marcillo, Jeff Johnson, Mario Ruiz, and Jonathan Lees. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE Internet Computing*, 10(2) :18_25, 2006.
- [54] Maarten Ditzel and Frans H. Elferink. Low-power radar for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd European Radar Conference (EuRAD'06)*, pages 139_141, Manchester, UK, September 2006.
- [55] Eric Brewer, et al. "The Case for Technology in Developing Regions," *IEEE Computer*, vol. 38, no. 6, pp. 25-38, June 2005,
- [56] <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-routage-1305/>
- [57] Lemia Louail, ‘Approches cross-layer pour l'optimisation de la latence des communications dans les réseaux de capteurs sans fil. (Approches cross-layer pour l'optimisation de la latence des communications dans les réseaux de capteurs sans fil)’ ,2016
- [58] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh et W. B. Heinzelman, “A taxonomy of wireless micro sensor network models”, *Mobile Computing and Communications Review*, vol. 6, no. 2, pp. 28-36, April 2002.
- [59] E.DHIB « Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de Capteurs »Ingénieur en Télécommunications option : Ingénierie des réseaux, école supérieure de communication de Tunis,2006/2007 .
- [60] Rajesh Chaudhary, Sonia Vatta, A tutorial of routing protocols in wireless sensor networks, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, Vol.3 Issue.6, June 2014.
- [61] Xuxun Liu and Jinglun Shi, “Clustering Routing Algorithms In Wireless Sensor Networks: An Overview’ , South China University of Technology Guangzhou, China
- [62] Shailesh Panchal, Gaurang Raval, Dr. S.N.Pradhan, ‘Optimization of Hierarchical Routing Protocol forWireless Sensor Networks with Identical Clustering ’ , *International Conference on Advances in Communication, Network, and Computing*,2010.

- [63] Tripti Sharma, Geetam Tomar, Brijesh Kumar, “Performance Comparison of LEACH, SEP and DEEC Protocol in Wireless Sensor Network” , Conference Paper · January 2012
- [64] Jigish Rana, Sangeeta Vhatkar, Mohommad Atique, Comparative Study of PEGASIS and PDCH Protocols in Wireless Sensor Network, International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology, 2015.
- [65] MAURICIO G.C. RESENDE, CELSO C. RIBEIRO - Greedy Random Adaptive Search Procedure 29/08/2002.
- [66] P. Festa and M. G. C. Resende. GRASP : An annotated bibliography. In C. C. Ribeiro and P. Hansen, editors, Essays and surveys in metaheuristics, pages 325–367. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [67] Jason Brownlee - Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes – 2011 – CC.
- [68] El-Ghazali Talbi - METAHEURISTICS FROM DESIGN TO IMPLEMENTATION – 2009 – Wiley.
- [69] Thomas A. FEO, Mauricio G.C. RESENDE A PROBABILISTIC HEURISTIC FOR A COMPUTATIONALLY DIFFICULT SET COVERING PROBLEM, Avril 1989.
- [70] PAOLA FESTA, MAURICIO G.C. RESENDE - Grasp: An Annotated Bibliography – 2001.
- [71] A GRASP Heuristic in the Choice of Clusterheads for Wireless Sensor Networks Provided as a Service / Rafael de Magalhaes Dias Frinhani Federal University of Itajuba´ Itajuba, Brazil.
- [72] S. Misra, I. Zhang, and S. C. Misra, Guide to wireless sensor networks. Springer Science & Business Media, 2009.
- [73] A GRASP Meta-Heuristic for Evaluating the Latency and Lifetime Impact of Critical Nodes in Large Wireless Sensor Networks, David Sembroiz, Behnam Ojaghi, Davide Careglio and Sergio Ricciardi , Department of Computer Architecture, Technical University of Catalonia—BarcelonaTech (UPC), 08034 Barcelona, Spain; careglio@ac.upc.edu (D.C.); sergior@ac.upc.edu (S.R.) , Department of Computer Engineering, TOBB University of Economics and Technology, 06560 Ankara, Turkey; bojaghi@uoc.edu ,Wireless Networks Research Lab (WINE), Universitat Oberta de Catalunya (UOC), 08860 Castelldefels, Spain.
- [74] Kahjogh, B.O.; Demirkol, I.; Careglio, D.; Pascual, J.D. The impact of critical node elimination on the latency of wireless sensor networks. In Proceedings of the 2017 Ninth

International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2017), Milan, Italy, 4–7 July 2017; pp. 182–187.

[75] Yildiz, H.U.; Tavli, B.; Kahjogh, B.O.; Dogdu, E. The Impact of Incapacitation of Multiple Critical Sensor Nodes on Wireless Sensor Network Lifetime. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2017, 6, 306–309.

[76] Yildiz, H.U.; Temiz, M.; Tavli, B. Impact of Limiting Hop Count on the Lifetime of Wireless Sensor Networks. *IEEE Commun. Lett.* 2015, 19, 569–572.

[77] W.B. Heinzelman et al. "An application specific protocol architecture for wireless micro sensor networks". *IEEE Transactions on Wireless Networking*, vol. 1, no.4, 2002, pp. 660-670.

[78] W.B. Heinzelman et al. "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks". 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.