

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

*Une nouvelle approche pour l'économie d'énergie dans
les réseaux de capteur sans fil*

Préparé par
YAICHI Salima et BAASSI Aicha

Encadré par
Mr. KADDI Mohammed

Année Universitaire 2019/2020

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) représentent une technologie émergente qui vise à offrir des solutions et des capacités innovantes. l'un des principaux problèmes dans les réseaux de capteurs est de développer un protocole de routage économe en énergie pour augmenter la durée de vie du réseau. Le clustering est l'une des techniques largement utilisées pour exploiter efficacement l'énergie du réseau.. Au cours des dernières années, de nombreuses approches méta-heuristiques ont été proposées à ce problème. Algorithme de Recherche Tabou est un algorithme méta-heuristique pour résoudre de nombreux problèmes d'optimisation. Dans ce mémoire nous proposons Tabou-LEACH comme un nouveau protocole de routage à base declustering en utilisant la méthode de recherche Tabou . L'analyse des performances et les résultats obtenus montrent que notre protocole proposé fonctionne bien en termes de consommation d'énergie, durée de vie du réseau et quantité de données envoyées à la station de base (BS) par rapport au célèbre protocole LEACH.

Mots clés: Algorithme de Recherche Tabou ; Efficacité énergétique ; Clustering ; Réseaux de capteurs sans fil ; Protocole de routage ; Durée de vie du réseau.

ملخص

تمثل شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs) تقنية ناشئة تهدف إلى تقديم حلول وقدرات مبتكرة. تتمثل إحدى المشكلات الرئيسية في شبكات الاستشعار في تطوير بروتوكول توجيه موفر للطاقة لزيادة عمر الشبكة. التجميع هو أحد الأساليب المستخدمة على نطاق واسع لتسخير الطاقة من الشبكة بكفاءة في السنوات الأخيرة ، تم اقتراح العديد من الأساليب الوصفية لهذه المشكلة. تعد خوارزمية البحث المحظور خوارزمية تلوي إرشادية لحل العديد من مشكلات التحسين. في هذه الرسالة، نقترح Tabou-LEACH كبروتوكول توجيه أساسي جديد لفك التباين باستخدام طريقة البحث Tabou. يُظهر تحليل الأداء والنتائج التي تم الحصول عليها أن بروتوكولنا المقترح يعمل جيداً من حيث استهلاك الطاقة وعمر الشبكة وكمية البيانات المرسل إلى المحطة الأساسية (BS) مقارنةً ببروتوكول LEACH الشهير.

الكلمات المفتاحية: خوارزمية بحث المحرمات ؛ كفاءة الطاقة ؛ التجميع ؛ شبكات الاستشعار اللاسلكية ؛ بروتوكول التوجيه ؛ عمر الشبكة.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) represent an emerging technology that aims to deliver innovative solutions and capabilities. One of the main problems in sensor networks is to develop an energy efficient routing protocol to increase the life of the network. Clustering is one of the widely used techniques to efficiently harness power from the grid. In recent years, many meta-heuristic approaches have been proposed to this problem. Taboo Search Algorithm is a meta-heuristic algorithm for solving many optimization problems. In this thesis we propose Tabou-LEACH as a new base declustering routing protocol using the Tabou search method. The performance analysis and the results obtained show that our proposed protocol works well in terms of power consumption, network lifetime and amount of data sent to the base station (BS) compared to the famous LEACH protocol.

Keywords: Tabou search Algorithm; Energy efficiency; Clustering; Wireless sensor networks; Routing Protocol; Lifetime



Dédicaces

Tout d'abord, je voulais que cette mémoire soit une œuvre de bienfaisance permanente pour l'âme de mon défunt et de ma bien-aimée (ma sœur Tasnim).

Et je prie Dieu de lui accorder la récompense de tous ceux qui sont tombés dessus et en ont bénéficié un jour.

Je le dédie aussi à

À mes chers parents et sœurs.

À tous mes chers et partenaires. À tous ceux qui m'ont aidé à réussir jusqu'à présent, en espérant qu'il sera toujours à la hauteur de ses attentes et de ses espoirs.

Aicha.





Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a oeuvré pour ma réussite, de par son amour, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

A toutes mes amies et mon binôme et à toute personne qui me connaît. A toute personne qui m'a aidé un jour à réussir jusque là, en espérant être toujours à la hauteur de leurs attentes et de leurs espoirs.

Safima.



Remerciement

-Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

-Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mr.Kaddi Mohammed qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses dirigés et sa contribution dans la réalisation de notre travail.

-Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire. Ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

Yaichi salima et Baassi aicha

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Dédicaces.....	iii
Remerciements.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	xiv
Liste des abréviations.....	xv
Introduction générale.....	1
Chapitre 01: Generalites Sur Les Reseaux De Capteurs Sans Fil	
1.1 introduction.....	4
1.2 les environnements mobiles.....	4
1.2.1 définition.....	4
1.2.2 architecteur des environnements mobiles.....	4
1.2.2.1 le réseau mobile avec infrastructure.....	4
1.2.2.2 le réseau mobile sans infrastructure.....	5
1.3 les réseaux.....	5
1.4 les réseaux sans fil.....	6
1.4.1 les réseaux cellulaires.....	6
1.4.2 les réseaux ad hoc.....	6
1.4.2.1 définition.....	6
1.4.2.2 définition les caractéristique de réseaux ad hoc.....	7
1.4.2.3 les applications de réseaux ad hoc.....	8
1.4.2.4 modélisation.....	9
1.5 les capteurs.....	9
1.5.1 définition d'un capteur.....	9
1.5.2 architecture d'un capteur.....	10
1.5.2.1 l'unité de traitement (processing unit).....	10
1.5.2.2 l'unité de capture (sensing unit).....	10

1.5.2.3 l'unité de communication (transceiver unit).....	10
1.5.2.4 unité d'énergie (power unit).....	10
1.6 les réseaux de capteurs sans fil.....	11
1.6.1 définition d'un réseaux de capteurs sans fil.....	11
1.6.2 domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil.....	11
1.6.2.1 application militaire.....	11
1.6.2.2 application agricoles.....	12
1.6.2.3 application médical.....	12
1.6.2.4 application environnementales.....	13
1.6.2.5 application commerciales.....	13
1.6.2.6 application à la sécurité.....	14
1.6.3 caractéristiques et contraintes d'un réseau de capteurs sans fil.....	14
1.7 conclusion.....	15
 Chapitre 02: Approche De Minimisation De La Consommation D'énergie	
2.1 Introduction.....	17
2.2 Notion de durée de vie d'un réseau.....	17
2.3 Ressources limitées.....	17
2.4 Bande passante limitée.....	17
2.5 Facteur d'échelle.....	17
2.6 Topologie dynamique.....	18
2.7 Agrégation de donnée.....	18
2.8 Sources de dissipation d'énergie.....	18
2.8.1 Energie de capture.....	18
2.8.2 Energie de traitement.....	19
2.8.3 Energie de communication.....	19
2.9 Techniques de conservation d'énergie.....	19
2.9.1 Techniques du Duty-cycling.....	20
2.9.2 Protocoles Sleep/Wakeup.....	20
2.9.3 Protocoles du niveau MAC.....	21
2.9.3.1 Protocoles MAC reposant sur TDMA.....	21

2.9.3.2	Protocoles MAC avec contention.....	22
2.9.3.3	Protocoles MAC hybrides.....	22
2.10	Techniques orientées données.....	23
2.10.1	Réduction des données.....	23
2.10.2	Acquisition de données efficace en énergie.....	24
2.11	Conclusion.....	24
Chapitre 03: Les Protocoles De Routage Dans Le RCSF		
3.1	Introduction.....	26
3.2	Le routage.....	26
3.3	Les protocoles de routage dans les RCSF.....	26
3.3.1	Les protocoles de routage selon la structure de réseau.....	26
3.3.1.1	Protocole de routage multi-chemin.....	27
3.3.1.2	Protocole de routage basé sur la négociation des données.....	27
3.3.1.3	Protocole de routage basé sur les interrogations.....	27
3.3.1.4	Protocole de routage basé sur la QoS.....	27
3.3.2	Les protocoles de routage selon le type.....	27
3.3.2.1	Les protocoles de routage plat (flat based-routing).....	28
3.3.2.2	Les protocoles de routage hiérarchique.....	28
3.3.2.3	Les protocoles de routage avec localisation géographique.....	29
3.4	Les protocoles de routage proposé pour les RCSF.....	29
3.4.1	Protocoles de routage hiérarchiques.....	30
3.4.1.1	LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy).....	30
3.4.1.2	PEGASIS (Power Efficient GA thering in Sensor Information Systems)....	30
3.4.1.3	HEED (Hybrid, Energy-E_ cient, Distributed approach).....	31
3.4.2	Protocoles de routage non hiérarchiques.....	32
3.4.2.1	AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector).....	32
3.4.2.2	GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing).....	33
3.4.2.3	Le protocole DSDV.....	33
3.5	Conclusion.....	34

Chapitre 04: La Recherche Tabou

4.1 Introduction.....	36
4.2 Méthodes Métaheuristiques.....	36
4.2.1 Définition des Méthodes Métaheuristiques.....	36
4.2.1.1 Principe de voisinage.....	37
4.2.2 L'algorithme tabou.....	37
4.2.2.1 Définition.....	37
4.2.2.2 Liste tabou.....	38
4.2.2.3 Structure algorithmique.....	38
4.2.2.4 Techniques d'améliorations.....	40
4.2.2.5 Les types de mémoire.....	41
4.3 Les travaux liés.....	42
4.4 Conclusion.....	44

Chapitre 05: Implimentation

5.1 Introduction.....	46
5.2 Le protocole LEACH.....	46
5.3 Le mécanisme de mise en veille.....	46
5.4 La recherche tabou.....	49
5.4.1 définition des solutions.....	49
5.4.1.1 La solution initiale.....	49
5.4.1.3 La solution S^*	50
5.4.1.4 La solution S_{best}	50
5.4.2 Formalisation et modélisation.....	50
5.4.2.1 Sélection du voisinage.....	52
5.4.2.2 Fonction objectif.....	52
5.4.2.3 La liste tabou.....	53
5.5 Implémentation et discussion.....	53
5.5.1 Langage de programmation utilisé.....	53
5.5.2 Le but de notre application.....	54

5.5.3 Le modèle énergétique.....	54
5.2.3.1 Les étapes de la simulation.....	55
5.5.4 Choix du paramètre du réseau.....	56
5.5.5 L’Affichage des informations des capteurs.....	56
5.5.6 Exécution de protocole LEACH et protocole tabou-LEACH.....	57
5.5.6.1 Simulation des protocoles.....	57
5.5.6.2 Les paramètres de simulation.....	58
5.5.6.3 Les résultats de simulation.....	59
5.7 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
Bibliographie.....	63

Liste des Figures

Figure1.1: mode infrastructure avec BSS.....	5
Figure1.2: le monde sans infrastructure (IBSS.).....	6
Figure1.3: le réseau avec infrastructure (cellulaire).....	6
Figure1.4: Réseau Ad Hoc.....	7
Figure1.5: Modélisation d'un réseau ad hoc.....	9
Figure1.6: Exemple d'un capteur.....	9
Figure1.7: Architecture d'un capteur.....	10
Figure1.8: Architecture d'un réseaux de capteurs sans fil.....	11
Figure1.9: Application militaire des RCSFs.....	12
Figure1.10: Application médical de RCSF.....	12
Figure1.11: Applications environnementales.....	12
Figure1.12: Applications commerciales de RCSF.....	13
Figure1.13: Application agricoles de RCSF.....	13
Figure1.14: Applications à la sécurité de RCSF.....	14
Figure 2.1: Classification des techniques de conservation d'énergie dans les RCSF.....	19
Figure 3.1 : Protocoles de routage pour les RCSF selon le type de protocole.....	26
Figure 3.2 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau.....	27
Figure 3.3: Routage plat.....	28
Figure 3.4: Routage hiérarchique.....	28
Figure 3.5 : Routage basé sur la localisation.....	29
Figure 3.6: Fonctionnement du protocole LEACH.....	29
Figure 3.7: Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV.....	30
Figure 3.8: Fonctionnement du protocole DSDV.....	33
Figure 4.1 : Organigramme du modèle de base de l'algorithme tabou.....	39
Figure 5.1: Mécanisme de mise en veille.....	47
Figure 5.2: L'interface de MATLAB.....	54
Figure 5.3 : Modèle de consommation d'énergie.....	55
Figure 5.4: Les étapes de simulation.....	55
Figure 5.5: L'interface de simulation.....	56
Figure 5.6: Affichage des informations des capteurs.....	57
Figure 5.7: Nombre des trames délivrés à la station de base.....	59

Figure 5.8: Energie résiduelle dans chaque rond.....	59
Figure 5.9: Nœuds morts dans le réseau.....	60
Figure 5.10: durée de vie des nœuds de capteurs.....	61

Liste des Tableaux

Tableau 4.1 : tableau de travaux liés	43
Tableau 5.1 : caractéristiques de l'appareil..	53
Tableau 5.2 : paramètre de simulation.....	58

Liste des abréviations

BSS : Basic Service Set

SB : Station de base

UM : unités mobiles

IBSS : Independent Basic Service Set

MANETS: Mobile Ad hoc NETwork

CAN : convertisseur analogique-numérique

RCSF : Réseaux de Capteurs Sans Fil

TDMA : Time Division Multiple Access

PDA : Personal Digital Assistant

SB : Station de base

ADC : Analog to Digital Converter

UCT : Unité de traitement

CPU : Central Processing Unit

RAM : Random Access Memory

EKE :Efficient K-CoverageEligibility

AKCE :Accurate K-CoverageEligibility

RSE : Redundant Sensor Elimination

LUC :Location Unware Coverage

CH : Cluster Head

WSN : Wireless sensor networks

LEACH :Hiérarchie de Clustering Adaptive en basse énergie

Introduction générale

Les progrès technologiques dans le domaine de l'électronique et le domaine des communications sans fil ont donné naissance à la création d'équipements à faible coût, appelés nœuds capteurs ou "motes", ces derniers peuvent communiquer via des ondes hertziennes (la radio) et collaborer entre eux pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Ce nouveau type de réseaux présente une grande amélioration comparé aux capteurs classiques qui sont généralement positionnés loin du phénomène surveillé. La position des nœuds utilisés n'est pas obligatoirement conçue au préalable, ce qui permet leur déploiement aléatoire dans les terrains inaccessibles ou pendant les opérations de secours aux cas de désastres.

Les réseaux de capteurs sont constitués de plusieurs capteurs minuscules ou nœuds ayant une caractéristique essentielle résidant dans l'absence d'infrastructure fixe et ayant une topologie changeante due à la mobilité des capteurs et pose le problème de l'épuisement de leurs batteries. Ces capteurs transmettent régulièrement les données au nœud central où les traitements sont accomplis et les données sont fusionnées jusqu'à l'aboutissement à la station de base.

Les principaux problèmes dans les réseaux de capteurs sans fil sont le routage, l'énergie consommée par les nœuds, la sécurité, l'agrégation de données, la mobilité imprévisible des nœuds, etc. Ces capteurs sont parfois déployés dans des zones hostiles, Il est donc nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau pour Augmenter son durée de vie en réduisant la perte d'énergie.

Les progrès récents dans les réseaux de capteurs sans fil ont conduit au développement de nombreux protocoles de routage hiérarchiques où la conservation de l'énergie est un facteur primordial.

Dans ce mémoire, nous proposons Tabou-LEACH comme un nouveau protocole de routage hiérarchique efficace en énergie pour les RCSF.

Ce nouveau protocole est basé sur un algorithme metaheuristique qui simule l'algorithme de recherche Tabou afin de sélectionner dynamiquement les clusters head optimale et former les clusters dans les RCSF

Notre travail est organisé en cinq chapitres selon un plan méthodologique suivant :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil leurs architectures de communication et leurs applications. Nous discuterons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les approches de minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les protocoles de routage dans le RCSF

Dans le quatrième nous présenterons l'algorithme de recherche tabou et son principe de fonctionnement.

Dans le cinquième chapitre, nous présenterons l'implémentation et l'évaluation des performances de notre protocole en le comparant au célèbre LEACH selon plusieurs critères. Ensuite, les résultats obtenus seront analysés et discutés.

Chapitre I

Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

L'avancée et le développement de la technologie dans le domaine des réseaux et du traitement de l'information ont conduit à l'émergence de réseaux et d'applications de capteurs. Les réseaux de capteurs sans fil ont également ouvert un certain nombre de domaines d'application différents. Des recherches sont toujours en cours autour de ce réseau et la poursuite de son application dans de nouveaux domaines en raison de sa grande importance à l'ère de la technologie.

1.2 Les environnements mobiles

1.2.1 Définition

Un environnement mobile est un système composé d'unités mobiles et qui permet à ses utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques [1].

1.2.2 Architecteur des environnements mobiles

Le réseau sans fil offre deux modes de fonctionnement, le mode avec infrastructure et le mode sans infrastructure ou mode ad hoc [2].

1.2.2.1 Le réseau mobile avec infrastructure :

En mode avec infrastructure, également appelé le mode BSS (Basic Service Set) certains sites fixes, appelés stations support mobile ou station de base (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec des sites ou unités mobiles (UM), localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule.

A chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, généralement fiable et d'un débit élevé. Les liaisons sans fil ont une bande passante limitée qui réduit sévèrement le volume des informations échangées. Dans ce modèle, une unité mobile ne peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base.

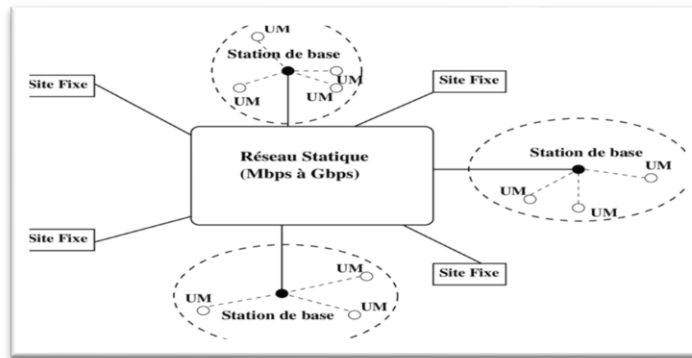


Figure1.1: Mode infrastructure avec BSS.

1.2.2.2 Le réseau mobile sans infrastructure :

Le réseau mobile sans infrastructure également appelé réseau Ad hoc ou IBSS (Independent Basic Service Set) ne comporte pas l'entité « site fixe », tous les sites du réseau sont mobiles et se communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil . L'absence de l'infrastructure ou du réseau filaire composé des stations de base, oblige les unités mobiles à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour les autres hôtes du réseau.

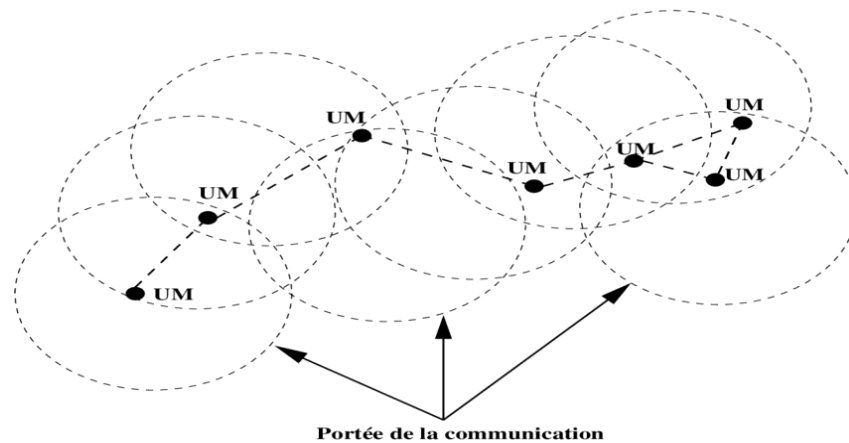


Figure1.2:Le mode sans infrastructure(IBSS).

1.3 Les réseaux

Dans différents domaines techniques (informatique, télécommunications, énergie, voirie, transport de l'eau, etc.), on appelle réseau un ensemble de nœuds (stations) reliés entre eux par des liens (ou canaux) afin d'échanger des informations, de partager des ressources, de transporter de la matière ou de l'énergie [3].

1.4 Les réseaux sans fil

Un réseau sans fil (Wireless network en anglais) est un réseau informatique qui connecte différents hôtes ou nœuds par des ondes radios. Les réseaux sans fil constituent avant tout une alternative aux réseaux câblés. Leur compatibilité avec les réseaux câblés permet également de les ajouter comme extension. C'est une technique qui permet aux particuliers, aux réseaux de télécommunications et aux entreprises de limiter l'utilisation de câbles entre diverses localisations. Dans cette se les réseaux sans fil ad hoc, et un cas particulier de ces derniers qui sont les réseaux de capteurs sans fil [4].

1.4.1 Les réseaux cellulaires:

La technologie cellulaire comprend deux ensembles d'entités les sites fixes et les sites mobiles, le type de liaison entre les sites fixes est filaires , elle est fiable avec haut débit alors que la liaison sans fil a une bande passante assez limitée qui réduit la taille des informations échangées Les stations de base (SB) et les unités mobile (UM) s'échangent des messages via une liaison sans fil dans une zone géographique limitée appelé cellule, sachant que chaque cellule comprend une station de base et qu'une unité mobile n'est directement connectée qu'à une seule station de base. Et l'unité mobile peut communiquer avec les autres sites à travers la station à laquelle elle est directement rattachée [5].

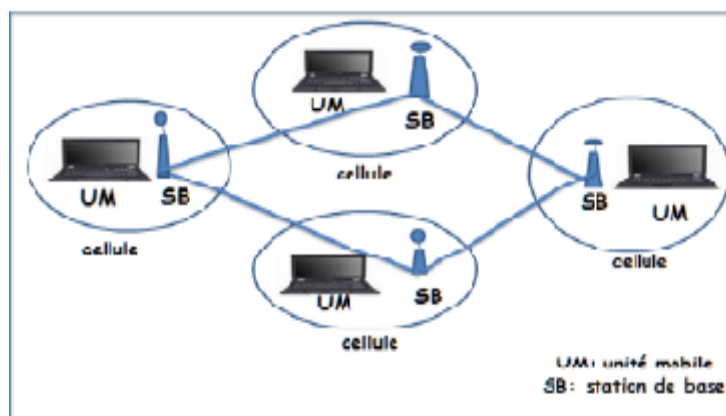


Figure 1.3 : le réseau cellulaire.

1.4.2 Les réseaux AD HOC

1.4.2.1 Définition

Les MANETS (Mobile Ad hoc Network) ne possèdent aucun site fixe ni de réseau filaire ou de station de base, c'est seulement un ensemble d'entités mobiles qui communiquent à travers un réseau sans fils ans aucune administration centralisée [6]

.Sachant quels entités mobiles sont dynamiquement et arbitrairement éparpillées d'une manière où l'interconnexion peut changer à tout moment.

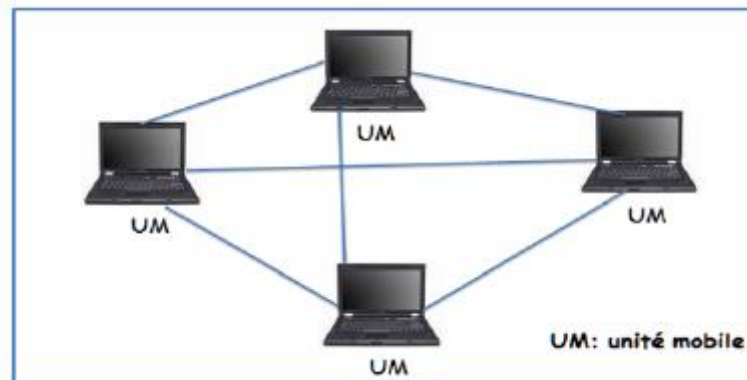


Figure 1.4 :Réseaux Ad Hoc.

1.4.2.2 Définition les caractéristique de réseaux AD HOC

Les caractéristiques des réseaux ad hoc sont très diversifiées et c'est ce qui fait de lui le plus préféré parmi les infrastructures existantes [7].

- **Topologie dynamique et auto-organisation:** Les unités mobiles du réseau se déplacent arbitrairement par conséquent la topologie du réseau peut changer à tout moment, c'est pour cela qu'un réseau adhoc doit s'organiser automatiquement pour pouvoir s'adapter aux conditions de propagation, et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des unités mobiles.
- **La taille du réseau:** la taille du réseau est souvent petite ou moyenne qui peut atteindre des centaines de nœuds ,mais le nombre de nœuds peut atteindre parfois des dizaines de milliers comme pour les réseaux de capteurs sans fil.
- **Absence d'infrastructure:** chaque nœud travail dans un environnement distribué et agit en tant que routeur pour relier la communication.
- **Les contraintes énergétiques:** les entités mobiles sont alimentées par une source d'énergie autonome telle que la batterie qui a une durée de vie limitée en plus de la fonction de routage qui consomme beaucoup d'énergie.
- **Une bande passante limitée:** la communication sans fil utilise un medium de communication partagé qui réduit la taille de la bande passante réservé aux unités mobiles.

- **Une sécurité physique limitée:** la sécurité des réseaux ad hoc est constamment mise à l'épreuve c'est dû essentiellement aux protocoles de routage, à l'environnement sans fil et à la nature de ces réseaux.
- **Qualité de service:** c'est difficile d'offrir une bonne qualité de service à cause de la mobilité des nœuds.

1.4.2.3 les applications de Réseaux AD HOC

Applications Les domaines d'applications des réseaux sans fil ad hoc sont nombreux et très riches, et nous pouvons citer les applications suivantes .

- **Applications de collaborations :** Les utilisateurs professionnels ont besoin d'applications particulières lors d'échanges entre collaborateurs. Ainsi, au cours de réunions ou de conférences, ces utilisateurs peuvent ressentir le besoin de former dans n'importe quel lieu un réseau pour s'échanger des informations, ou faire une vidéo conférence entre bureaux voisins Les réseaux ad hoc sont bien appropriés à ces besoins
- **Urgences :** Lors de catastrophes d'origine naturelles (comme les tremblements de terre, les tsunamis, les feux de forêt ou d'habitations...) ou non, les infrastructures préexistantes peuvent ne pas être opérationnelles compliquant d'autant plus les besoins de communications des moyens de secours Les réseaux sans fil, par leur compacité et leur rapidité de déploiement, permettent aux différentes équipes de secours d'établir rapidement des liaisons et d'échanger des informations.
- **Militaires :** Lors d'interventions en milieu hostile, il peut être difficile ou trop encombrant d'utiliser un réseau à infrastructure. Les réseaux sans fil sont parfaitement bien adaptés à ce type d'environnement où les déplacements restent peu rapides et peu soutenus.
- **Etendre les réseaux :** un des major problème des réseaux avec infrastructure est la couverture limitée, pour cela les réseaux ad hoc sont sollicités afin d'étendre la couverture des réseaux cellulaires par exemple .

Pour plus d'information concernant les domaines d'application des réseaux Ad Hoc merci de Consulter [8] Le contexte de nos travaux s'inscrit dans le dernier point présenté, qui est: l'extension des réseaux filaire ou réseau avec infrastructure.

1.4.2.4 Modélisation

Un réseau mobile ad hoc peut être modélisé par un graphe $G_t = (V_t, E_t)$ où :

V_t : représente l'ensemble des nœuds (les unités ou les hôtes mobiles) du réseau.

E_t : modélise l'ensemble des connexions qui existent entre ces nœuds. Si $e = (u, v) \in E_t$, cela veut dire que les nœuds u et v sont en mesure de communiquer directement à l'instant t [9].

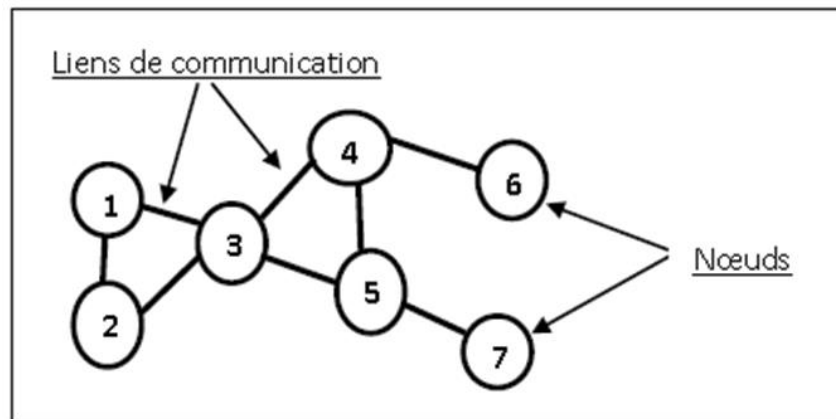


Figure 1.5 : Modélisation d'un réseau AD HOC.

1.5 les capteurs

1.5.1 Définition d'un capteur :

Un capteur est un petit appareil autonome capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat, comme la température, la vibration, la pression, etc. Chaque capteur assure trois fonctions principales : la collecte, le traitement et la communication de l'information vers un ou plusieurs points de collecte appelés station de base (SB) [10].

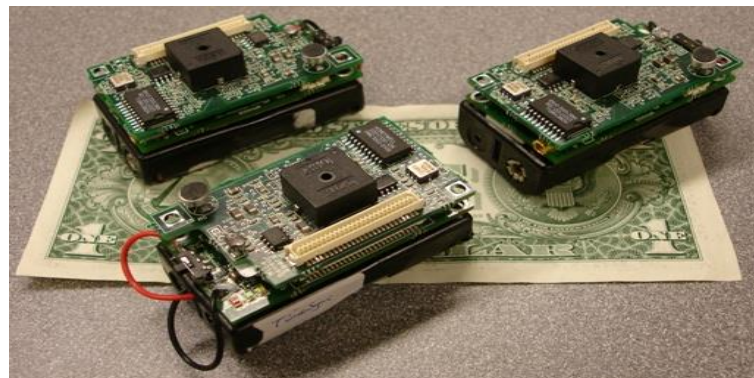


Figure1.6: Exemple d'un capteur.

1.5.2 Architecture d'un capteur:

Un capteur contient quatre unités de base : captage, traitement, communication, et énergie, Cependant des composants additionnels peuvent lui être attribués selon le domaine d'application, tels que : un générateur d'énergie, un système de localisation et un mobilisateur.

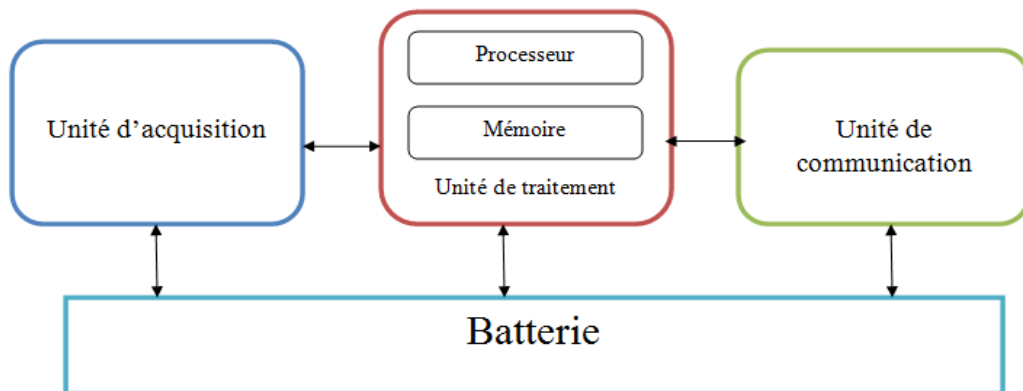


Figure1.7: Architecture d'un capteur.

1.5.2.1 L'unité de traitement (Processing unit):

comprend un processeur qui permet de stocker les données transmises par l'unité de capture dans la mémoire [11], l'unité de traitement exécute aussi les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds du réseau pour donner, en fin, le résultat de la tâche assignée au réseau.

1.5.2.2 L'unité de capture (Sensing unit) :

Elle permet de capter et de collecter des informations elle est composée de deux sous unités d'un capteur ,et d'un convertisseur analogique-numérique(CAN) qui les transformes en signaux numériques et les transmet à l'unité de traitement [12].

1.5.2.3 L'unité de communication (Transceiver unit):

Elle est chargé d'assurer toutes les communications c'est-à-dire toutes émission ou réception entre les différents nœuds du réseau via une liaison optique ou de type radio fréquence [11].

1.5.2.4 Unité d'énergie (Power unit):

L'énergie est un élément crucial concernant la durée de vie du capteur et du réseau,

donc cette unité est chargé de l'alimentation des différents composants du capteur par batterie et par d'autre ressource externe tel que les cellules solaires [13].

1.6 Les réseaux de capteurs sans fil

1.6.1 Définition d'un réseaux de capteurs sans fil

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil [14].

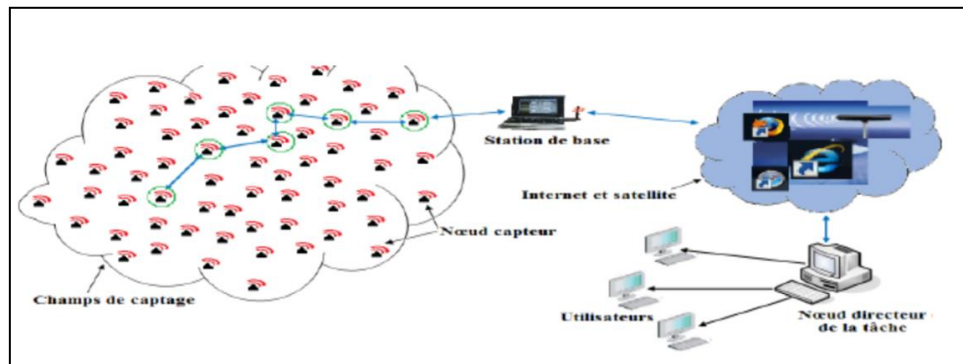


Figure1.8: Architecture d'un réseaux de capteurs sans fil.

1.6.2 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

Le champ d'applications des réseaux de capteurs est de plus en plus élargi grâce aux évolutions techniques que connaissent les domaines de l'électronique et des télécommunications. Parmi ces évolutions, on peut citer la diminution de taille et du coût des capteurs, ainsi que l'élargissement des gammes de capteurs disponibles (mouvement, température, ...) et l'évolution des supports de communication sans fil. En effet, les applications des réseaux de capteurs peuvent être militaires, médicales, environnementales, commerciales, etc.

1.6.2.1 Application militaire:

Un réseau de capteurs déployé dans un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'un surveiller tous les mouvements (allies ou ennemis), ou d'analyser le champ de bataille avant d'un envoyer du renfort ([15] [16]).



Figure1.9:Application militaire des RCSFs.

1.6.2.2 Application agricoles:

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole [17].



Figure1.10 :Application agricoles de RCSF.

1.6.2.3 Application médical

Il existe déjà dans le monde médical, des gélules multi-capteurs pouvant être avalées qui permettent, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur du corps humain ([18] [19]).

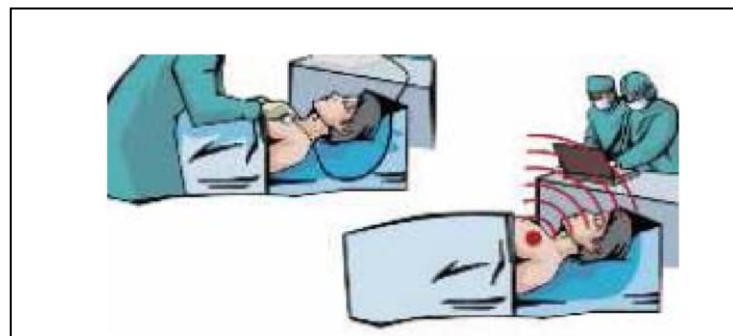


Figure1.11:Application médical des RCSFs.

1.6.2.4 Application environnementales

Des capteurs de température peuvent être dispersés à partir d'avions dans le but de détecter d'éventuels problèmes environnementaux dans le domaine couvert par les capteurs dans une optique d'intervenir à temps afin d'empêcher que d'éventuels incendie, inondation, volcan ou tsunami ne se produisent ([20] [21] [22]).



Figure1.12: Applications environnementales.

1.6.2.5 Application commerciales

Des nœuds capteurs peuvent être utilisés pour améliorer les processus de stockage et de livraison. Le réseau peut ainsi être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'une marchandise. Un client attendant une marchandise peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position des marchandises qu'il a commandées [23].



Figure1.13: Applications commerciales de RCSF.

1.6.2.6 Application à la sécurité

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure [24].



Figure1.14: Applications à la sécurité de RCSF.

1.6.3 Caractéristiques et contraintes d'un réseau de capteurs sans fil

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit:

- **Tolérance aux pannes** : Les algorithmes et protocoles doivent tenir compte du fait qu'un nœud peut cesser de fonctionner par manque d'énergie ou parce qu'il a été détruit accidentellement par un animal ou intentionnellement par des personnes. Ils devront adapter leur niveau de tolérance aux pannes en fonction de hostilité du milieu dans lequel est déployé le réseau [25].
- **Le facteur d'échelle** : Le nombre de nœuds de capteurs augmente sur un réseau sans fil et ce nombre peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions entre les nœuds et peut imposer des difficultés pour le transfert de données [26].
- **Environnement de déploiement** : Dans la majorité des applications, les nœuds capteurs sont déployés dans des zones distantes, hostiles et sans aucune surveillance ni intervention humaine. Les capteurs doivent être conçus pour résister aux différentes conditions climatiques telles que la chaleur, humidité, le froid, la pression ...etc. [27].

- **La topologie du réseau** : Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...) et redéploiement de nœuds additionnels quand le taux de couverture de la zone d'intérêt diminue au-dessous d'un certain seuil [26].
- **Bande passante limitée** : afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteur ou les fréquences de transmissions ne sont pas importantes [28].
- **Sécurité physique limitée** : Les RCSF sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques, cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé. Les RCSF connaissent actuellement une grande extension et une large utilisation dans différents types d'applications, dont celles exigeant une grande sécurité. Leurs contraintes font que l'application des mesures classiques de sécurité, sur les RCSF, est restreinte [20].

1.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les réseaux de capteurs sans fil de façon générale, en mettant le point sur l'architecture des RCSFs, ainsi que leurs principaux domaines d'application et leurs caractéristiques et contraintes de conception.

Les Problématiques de ce type de réseaux sont nombreuses, à savoir, tel que les problèmes de l'énergie et de la couverture.

Dans le chapitre suivant, nous allons essayer, de citer quelques techniques de conservation d'énergie existantes dans un réseau de capteurs sans fil.

Chapitre II

Approches de

minimisation de la

consommation

d'énergie

2.1 Introduction

L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner. Les capteurs sont conçus pour fonctionner durant des mois voire des années. Ainsi, la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. A noter qu'une fois qu'un nœud capteur a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant. Ainsi, il y a une forte probabilité de perdre la connectivité du réseau [29].

2.2 Notion de durée de vie d'un réseau

La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain niveau. La vie du système est donc liée à la vie nodale, même si elle peut en différer. La vie nodale correspond à la vie d'un des nœuds du réseau. Elle dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie qu'il consomme en fonction du temps et la quantité d'énergie dont il dispose. Selon la discussion de Akyildiz et al. [30], la quantité prédominante d'énergie est consommée par un nœud-capteur durant la détection, la communication puis le traitement des données.

2.3 Ressources limitées :

En plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse.

2.4 Bande passante limitée :

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s.

2.5 Facteur d'échelle :

Les applications des réseaux sans fil actuel exigent de la centaine jusqu'à des milliers des capteurs sans fil pour leurs fonctionnements, pour cela on trouve que l'extensibilité est un facteur indispensable dans la conception des RCSF [31].

2.6 Topologie dynamique :

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

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles.
- Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
- Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.

2.7 Agrégation de donnée :

Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie.

2.8 Sources de dissipation d'énergie

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la capture, le traitement et la communication [32, 33].

2.8.1 Energie de capture

La capture est effectuée par les composants d'acquisition qui traduisent les phénomènes physiques en signal électrique. La consommation d'énergie du module de détection dépend de la spécificité du capteur. Dans de nombreux cas, elle est négligeable par rapport à l'énergie consommée par les modules de traitement et communication. L'énergie consommée lors de la capture peut être réduite en utilisant des composants à faible consommation d'énergie. Une autre façon de réduire l'énergie consommée lors de la capture consiste à réduire la durée de capture et supprimer les captures jugées redondantes et inutiles [34].

2.8.2 Energie de traitement

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergies : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication [34].

2.8.3 Energie de communication

L'énergie de communication se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergies en état de veille. Cette énergies est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance, quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur [35, 36].

2.9 Techniques de conservation d'énergie

Plusieurs classifications des techniques de conservation d'énergie ont été proposées dans la littérature. Ilyas et Mahgoub ont proposé dans [37] l'une des principales classifications de ces techniques de conservation d'énergie.

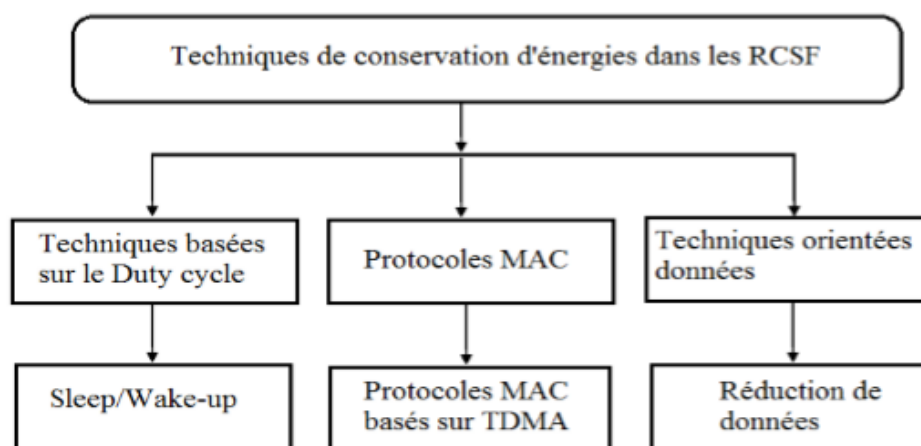


Figure 2.1: Classification des techniques de conservation d'énergie dans les RCSF .

les techniques de conservation d'énergie dans les RCSF peuvent être classées en trois grandes familles qui sont les protocoles MAC basés sur les techniques de "duty cycle"

(sleep/wake-up), les protocoles MAC basés sur TDMA et les techniques orientées données. Notons également que d'autres protocoles MAC hybrides combinant des techniques d'accès TDMA et CDMA ont été développés pour les RCSF.

2.9.1 Techniques du Duty-cycling

Principalement cette technique est utilisée dans l'activité réseau. Pour conserver l'énergie il faut mettre la radio de l'émetteur en mode veille (low-power) à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire, dans le cas où n'y a plus de données à envoyer et où à recevoir la radio doit être éteinte et devrait être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu.

Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé Duty-cycling. Un Duty-cycle est défini comme étant la fraction de temps où les nœuds sont actifs.

Lorsque les nœuds capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de Duty-cycling. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates aux quelles des nœuds décident de passer entre l'état actif et l'état sommeil. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets, même si les nœuds ont un faible duty-cycle c'est-à-dire ils dorment la plupart du temps. [38]

2.9.2 Protocoles Sleep/Wakeup

Comme mentionné précédemment, un régime sleep/wakeup peut être défini pour un composant donné « le module Radio » du nœud-capteur. On peut relever les principaux plans sleep/wakeup implantés sous forme de protocoles indépendants au-dessus du protocole MAC (au niveau de la couche réseau ou de la couche application). Dans le document [ARM05], les protocoles sleep/wakeup sont divisés en trois grandes catégories : à la demande, rendez-vous programmés, régimes asynchrones. [38]

- **les protocoles à la demande** : l'idée de base est qu'un nœud devrait se réveiller seulement quand un autre nœud veut communiquer avec lui. Le problème principal associé aux régimes à la demande est de savoir comment informer un nœud en sommeil qu'un autre nœud est disposé à communiquer avec lui. À cet effet, ces systèmes utilisent généralement plusieurs radios avec différents compromis entre

énergie et performances (i.e. une radio à faible débit et à faible consommation pour la signalisation, et un radio à « haut » débit mais à plus forte consommation pour la communication de données).

- **Les protocoles à rendez-vous programmés** : L'idée est que chaque nœud doit se réveiller en même temps que ses voisins. Typiquement, les nœuds se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et restent actifs pendant un court intervalle de temps pour communiquer avec leurs voisins. Ensuite, ils se rendorment jusqu'au prochain rendez-vous.
- **un protocole sleep/wakeup asynchrone** : Avec les protocoles asynchrones, un nœud peut se réveiller quand il veut et tant qu'il est capable de communiquer avec ses voisins. Ce but est atteint par des propriétés impliquées dans le régime sleep/wakeup, aucun échange d'informations n'est alors nécessaire entre les nœuds. Quelques régimes sleep/wakeup asynchrones sont proposés dans.

2.9.3 Protocoles du niveau MAC

Plusieurs protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil ont été proposés, et de nombreux états de l'art et introductions aux protocoles MAC sont disponibles dans la littérature. La plupart d'entre eux mettent en œuvre un régime avec un faible duty-cycle pour gérer la consommation d'énergie. Nous avons recensés les protocoles MAC les plus communs en les classant en trois catégories : les protocoles fondés sur TDMA (Time Division Multiple Access), les protocoles utilisant la contention et les protocoles hybrides. [38]

2.9.3.1 Protocoles MAC reposant sur TDMA

Dans les protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA le temps est divisé en trames (périodiques) et chaque trame se compose d'un certain nombre de slots de temps. À chaque nœud est attribué un ou plusieurs slots par trame, selon un certain algorithme d'ordonnancement. Il utilise ces slots pour l'émission/réception de paquets de/vers d'autres nœuds. Dans de nombreux cas, les nœuds sont regroupés pour former des clusters avec un cluster head qui est chargé d'attribuer les slots de temps pour les nœuds de son cluster.

Les protocoles TDMA sont par nature efficaces en énergie, puisque les nœuds n'allument leur radio que lors de leurs propres slots et s'endorment le reste du temps. Toutefois, dans la pratique, les protocoles TDMA ont plusieurs inconvénients qui compensent les avantages en termes d'économie d'énergie.

Parmi ces inconvénients on décrit : Premièrement, les algorithmes classiques de réservation de slots ont tendance à être complexes, peu flexibles et présentent des problèmes lors du passage à l'échelle. En effet, dans un véritable réseau de capteurs, les changements de topologie sont fréquents (conditions variables du canal, défaillances de nœuds, . . .) et la répartition des slots peut être problématique donc dans de nombreux cas, une approche centralisée peut être adoptée.

Deuxièmement, ils requièrent une synchronisation très précise et ils sont très sensibles aux interférences. En outre, les protocoles TDMA fonctionnent moins bien que les protocoles avec contention lors d'un trafic faible. C'est pour toutes ces raisons que les protocoles MAC TDMA ne sont pas très fréquemment utilisés dans les réseaux de capteurs.

2.9.3.2 Protocoles MAC avec contention

Les protocoles avec contention sont les plus populaires et représentent la majorité des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Ils assurent le duty-cycle par une intégration étroite des fonctionnalités d'accès au canal avec un régime sleep/wakeup. La seule différence est que, dans ce cas, l'algorithme sleep/wakeup n'est pas un protocole indépendant.

Les protocoles fondés sur la contention sont robustes et garantissent le passage à l'échelle. En outre, ils ont généralement un délai plus faible que ceux reposant sur TDMA et ils peuvent facilement s'adapter aux conditions de trafic. Malheureusement, leur dissipation d'énergie est plus élevée que celle des protocoles TDMA à cause de la contention et des collisions. Des mécanismes Duty-cycle peuvent contribuer à réduire la surconsommation d'énergie, mais ils doivent être conçus avec soin pour être flexibles et à faible latence.

2.9.3.3 Protocoles MAC hybrides

L'idée de base des protocoles MAC hybrides (changement du comportement du protocole entre TDMA et CSMA en fonction du niveau de contention) n'est pas nouvelle. Concernant les réseaux de capteurs sans fil, Z-MAC est l'un des protocoles les plus intéressants. Afin de définir le schéma principal du contrôle de transmission, Z-MAC commence par une phase préliminaire de configuration. Chaque nœud construit une liste de voisins à deux sauts par le biais du processus de découverte de voisins. Puis, un algorithme distribué d'attribution des slots est appliqué pour faire en sorte que deux nœuds

dans un voisinage à deux sauts ne soient pas affectés au même slot. Par conséquent, on est assuré qu'une transmission d'un nœud avec un de ses voisins à un saut n'interfère pas avec les transmissions de ses voisins à deux sauts.

Les protocoles hybrides tentent de combiner les point forts des protocoles MAC fondés sur TDMA et ceux avec contention tout en compensant leurs faiblesses. Toutefois, ces techniques semblent être complexes pour être réalisables dans un déploiement d'un grand nombre de nœuds. [38]

2.10 Techniques orientées données

Généralement, les plans Duty-cycling ne tiennent pas compte des données prélevées par les nœuds. Par conséquent, des approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en énergie. En fait, la détection (ou prélèvement de données) affecte la consommation d'énergie de deux manières :

- Des échantillons inutiles : les données échantillonnées ont souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelle, il est donc inutile de communiquer les informations redondantes à la Station de Base. Un échantillonnage inutile implique une consommation d'énergie à son tour inutile. En effet, même si le coût de l'échantillonnage est négligeable, cela induit aussi des communications tout le long du chemin qu'emprunte le message.
- La consommation électrique du module de détection : réduire la communication ne suffit pas lorsque le capteur est lui-même très consommateur. Des techniques orientées données sont conçues pour réduire la quantité d'échantillonnage de données en garantissant un niveau de précision acceptable dans la détection pour l'application.

2.10.1 Réduction des données

Réduire les données en termes de volume ou de nombre de paquets, dans les RCSF peut avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie due à la communication. Parmi les méthodes de réductions de données, nous trouvons le In-network processing qui consiste à réaliser de l'agrégation de données (par exemple, calculer la moyenne de certaines valeurs) au niveau des nœuds intermédiaires entre la source et le Sink. Ainsi, la

quantité de données est réduite tout en parcourant le réseau vers le Sink. Une agrégation de données appropriée est spécifique à l'application.

La compression de données peut être appliquée également pour réduire la quantité d'informations transmises par les nœuds sources. Ce régime implique l'encodage d'informations au niveau des nœuds qui engendrent des données, et le décodage au niveau du Sink. [38]

2.10.2 Acquisition de données efficace en énergie

De nombreuses applications émergentes ont d'applications a de réelles contraintes dues à la détection. Ceci va à l'encontre de l'hypothèse générale selon laquelle la détection n'est pas significative d'un point de vue consommation d'énergie. En fait, la consommation d'énergie du module de détection peut, non seulement être significative, mais encore supérieure à la consommation d'énergie de la radio ou même plus grande que la consommation d'énergie du reste du nœud-capteur.

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu la définition de notion de durée de vie d'un réseau dans les RCSFs, Ressources limitées, Bande passante limitée, Facteur d'échelle, Topologie dynamique, Agrégation de donnée, et sources de dissipation d'énergie on a aussi cité la classification des méthodes de conservation d'énergie. Dans le chapitre suivant on va étudier les protocoles de routage dans RCSFs et l'influence de l'une de ces techniques sur l'optimisation de la consommation d'énergie et par conséquent la prolongation de la durée de vie des RCSFs. Cette technique va être implémenté et testé sur l'une des algorithmes de la littérature.

Chapitre III

Les protocoles de routage dans le RCSF

3.1 Introduction

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.

Nous présenterons dans ce chapitre les principaux protocoles de routage dans les RCSFs car la présentation de ces protocoles nous permettra de mieux analyser le fonctionnement.

3.2 Le routage

Le routage est une méthode d'acheminement des informations vers la bonne destination à travers un réseau de connexion donné, il consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, un établissement de routes qui soient correctes et efficaces entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau, ce qui assure l'échange des messages d'une manière continue [39].

3.3 Les protocoles de routage dans les RCSF

Les protocoles de routage dans les réseaux peuvent être classés selon deux concepts :

- la structure de réseau.
- le type de protocole.

3.3.1 Les protocoles de routage selon la structure de réseau

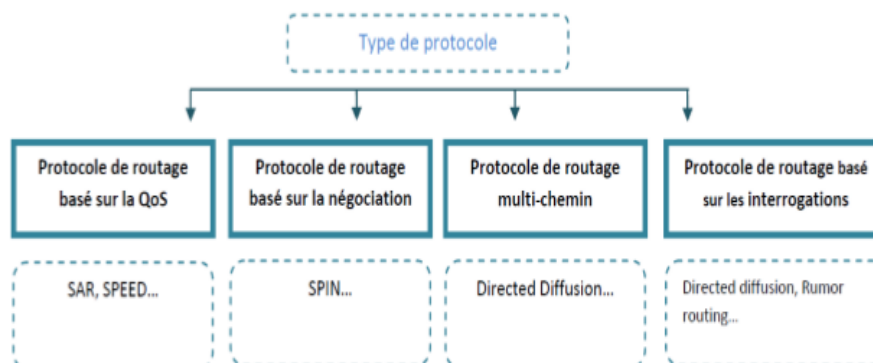


Figure 3.1 : Protocoles de routage pour les RCSF selon le type de protocole.

3.3.1.1 Protocole de routage multi-chemin

Il se base sur l'adoption de plus qu'un chemin menant vers la destination, et ce, pour avoir des chemins de secours si jamais le chemin principal serait rompu. la capture consiste à réduire la durée de capture et supprimer les captures jugées redondantes et inutiles [40].

3.3.1.2 Protocole de routage basé sur la négociation des données

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés META-DATA. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre [41]. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données.

3.3.1.3 Protocole de routage basé sur les interrogations

La collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le noeud « Sink ».

3.3.1.4 Protocole de routage basé sur la QoS

Ce type de protocoles tend à satisfaire certaines métriques, pendant la transmission des données vers la destination finale. Parmi ces métriques, nous citons : le délai de bout en bout, la gigue, PDR (Paquet Delivery Ratio), énergie consommée.

3.3.2 Les protocoles de routage selon le type

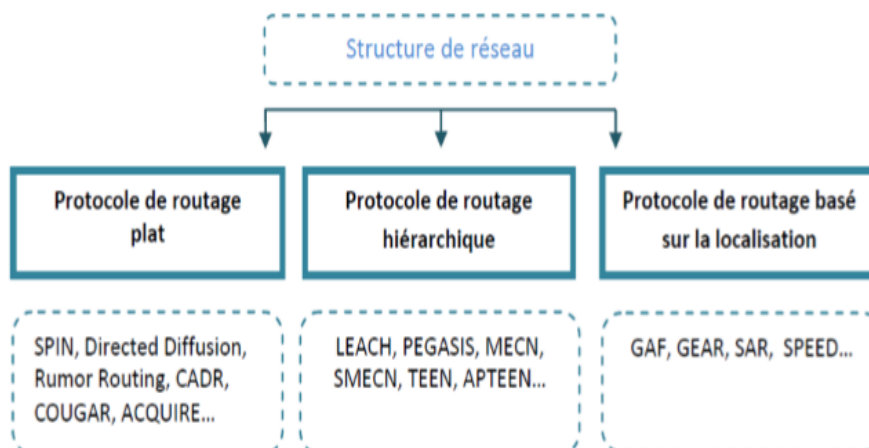


Figure 3.2 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau.

3.3.2.1 Les 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.

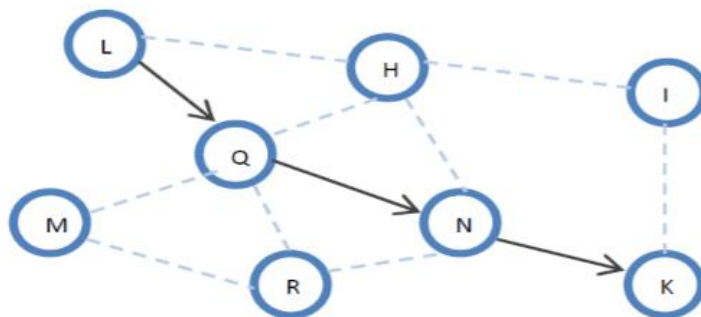


Figure 3.3 : Routage plat.

3.3.2.2 Les protocoles de routage hiérarchique

Ces protocoles fonctionnent en confiant des rôles différents aux nœuds du réseau. Certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Un nœud peut être, par exemple, une passerelle pour un ensemble de nœuds. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination qui lui est directement attaché.

Un exemple est donné par la figure 3.4 : Pour que les paquets générés par le nœud F atteignent le nœud L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R.

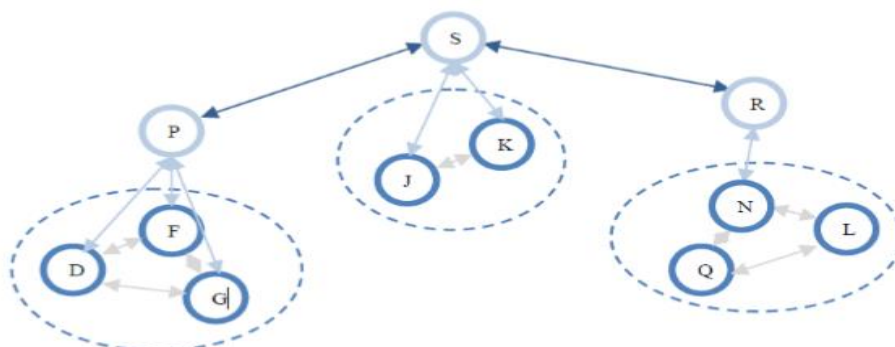


Figure 3.4: Routage hiérarchique.

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 [41].

3.3.2.3 Les protocoles de routage avec localisation géographique

Un routage est dit géographique lorsque les décisions de routage sont basées sur la position des nœuds [42]. Les prés-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.

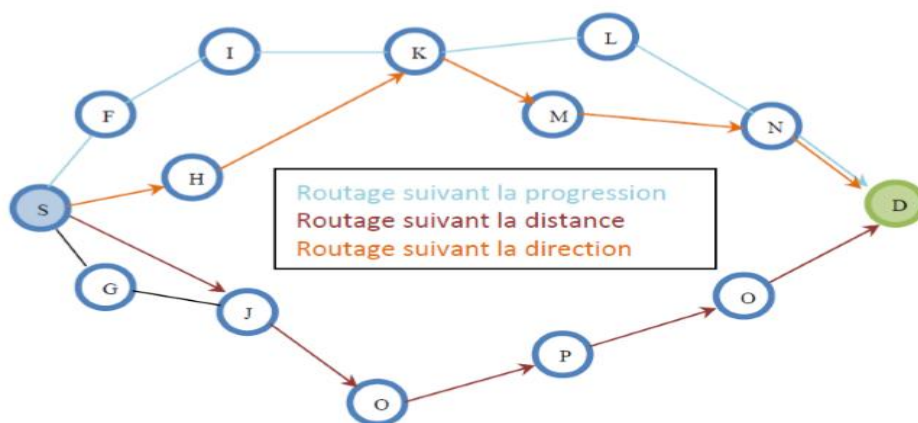


Figure 3.5 : Routage basé sur la localisation.

3.3 Les protocoles de routage proposé pour les RCSF

Nous citons dans cette section quelques protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs sans fil.

3.3.1 Protocoles de routage hiérarchiques

3.3.1.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH est l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des clusters-Head locaux comme passerelle pour atteindre la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie car les transmissions ne sont effectuées que par les cluster-Head plutôt que par tous les nœuds de capteurs [43].

LEACH suppose que chaque nœud du réseau peut communiquer directement avec le puits, alors que, les nœuds non-Cluster Head ne peuvent communiquer qu'avec leurs Cluster Head choisi, en utilisant la technique TDMA instaurée par ce dernier. Cette technique permet de minimiser les collisions en allouant à chaque nœud un temps privé pour transmettre ses données vers son CH. LEACH préconise, également, une agrégation de données au niveau des CHs pour plus de conservation d'énergie [44].

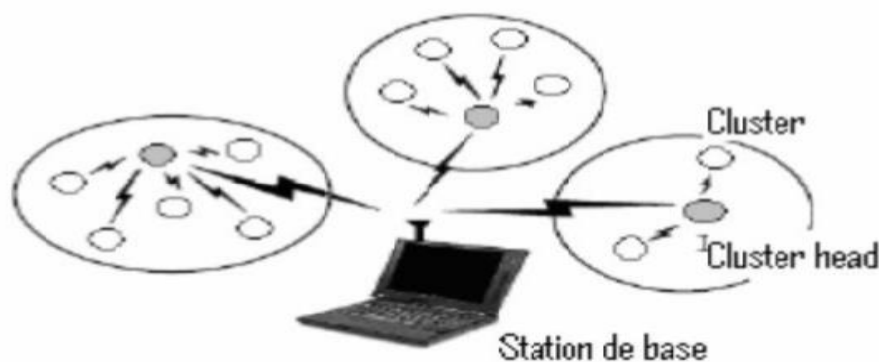


Figure 3.6: Fonctionnement du protocole LEACH.

Avantage

_ La consommation d'énergie est partagée sur l'ensemble des nœuds prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

Inconvénient

_ Les CHs les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station.

3.3.1.2 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

PEGASIS est une amélioration du protocole LEACH. Au lieu de former plusieurs clusters, PEGASIS forme des chaînes de nœuds de sorte que chaque nœud transmet et

reçoit du nœud voisin appartenant à la chaîne. Un seul nœud est choisi, parmi cette chaîne, pour transmettre au sink. Ce nœud est nommé (leader node). Les données recueillies se déplacent d'un nœud à un autre, et seront agrégées puis envoyées au sink par le nœud leader. Dans le PEGASIS hiérarchique les nœuds construisent une chaîne qui forme un arbre hiérarchique. Chaque nœud leader, choisi dans un niveau particulier, transmet des données aux nœuds du niveau supérieur de la hiérarchie jusqu'à atteindre la station de base Sink [45].

3.3.1.3 HEED (Hybrid, Energy-Efficient, Distributed approach)

Les auteurs de [46] ont proposé un algorithme de clustering distribué appelé HEED pour les réseaux de capteurs. Contrairement aux techniques précédentes, HEED ne fait aucune restriction sur la distribution et la densité des nœuds. Il ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille mais il suppose que les capteurs ont la possibilité de modifier leur puissance de transmission. HEED sélectionne les cluster-heads selon un critère hybride regroupant l'énergie restante des nœuds et un second paramètre tel que le degré des nœuds. Il vise à réaliser une distribution uniforme des clusters heads dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille. Un nœud u est élu comme cluster head avec une probabilité P_{ch} égale à

$$P_{ch} = C_{prob} \cdot E_n / E_{total} \quad (3.1)$$

Où :

- E_n est l'énergie restante du nœud n .
- E_{total} est l'énergie globale dans le réseau.
- C_{prob} est le nombre optimal de clusters.

Cependant, l'évaluation de E_{total} présente une certaine difficulté, à cause de l'absence de toute commande centrale. Un autre problème réside dans la détermination du nombre optimal de clusters. De plus, HEED ne précise pas de protocole particulier à utiliser pour la communication entre les clusters heads et le sink. A l'intérieur du cluster, le problème ne se pose pas car la communication entre les membres du cluster et le cluster Head est directe (à un saut). D'autre part, avec HEED, la topologie en clusters ne réalise pas de consommation minimale d'énergie dans les communications intra-cluster et les clusters générés ne sont pas équilibrés en taille.

Avantages

_ HEED prolonge la durée de vie du réseau en distribuant l'énergie de la communication et le nombre de CHs d'une façon uniforme et donc produire des clusters compact tout en minimisant la charge des messages de contrôle.

_ HEED n'indique aucune supposition sur la distribution ou la densité des nœuds, ainsi que leurs capacités.

Inconvénients

_ Le fait, que le choix des CHs est une décision qui ne se base que sur des informations locales, des insuffisances dans la fonction du cout seront présentées telle le cas de la communication inter-clusters qui n'est pas prise en considération par cette fonction.

_ Les clusters générés avec HEED ne sont pas tellement équilibrés en taille.

3.3.2 Protocoles de routage non hiérarchiques

3.3.2.1 AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

Le protocole AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) [47] représente essentiellement une amélioration de l'algorithme DSDV dans le contexte réactif. Il est spécialement conçu pour les réseaux mobiles pour créer et découvrir les liaisons entre la source et la destination [48, 49]. Il est utilisé pour des routages unicast et multicast en utilisant des requêtes de type (route request / route reply). Avec AODV, chaque nœud a une table de routage qui donne des informations sur ses voisins, la table joue un rôle dans le choix d'un voisin qui va transmettre les paquets de la source vers la destination. Lorsque la source a des données à envoyer vers une destination, elle diffuse une requête de type Route Request (RREQ). Lorsque le nœud reçoit RREQ, il met à jour ses informations pour le nœud source et il ajoute une nouvelle route valide à sa table de routage pour atteindre la source qui a envoyé RREQ. Lorsque RREQ arrive à la destination, celle-ci génère une réponse de type Route Reply (RREP). RREP est renvoyé vers la source comme le montre la figure 3.8 Chaque nœud possède un numéro de séquence qui permet de choisir la route la plus récente et de maintenir la consistance des informations de routage [49].

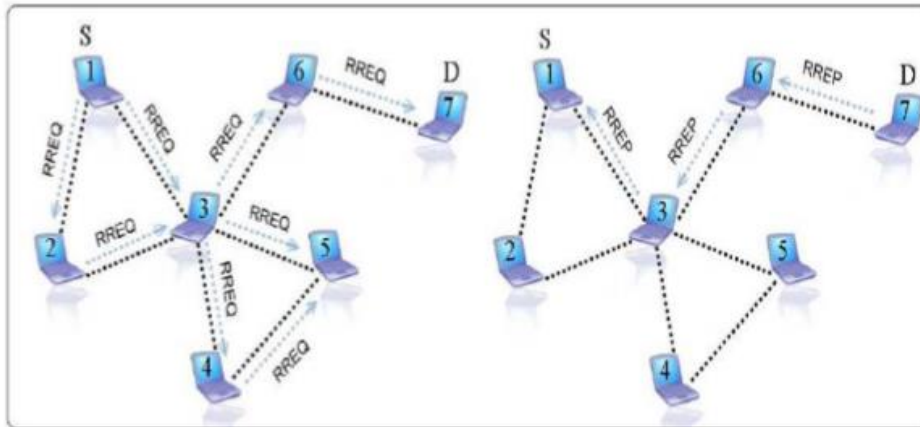


Figure 3.7: Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV

Avec AODV, s'il existe plusieurs routes possibles de la source vers la destination, AODV choisit la route la plus courte (la route où il y a un minimum de sauts). Si un tour de routage échoue, la source relance un nouveau RREQ avec un temps T plus important. Si plusieurs séries de Route Request échouent, alors aucune route ne peut être trouvée [50]

3.3.2.2 GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

La topologie a un caractère relativement provisoire dû à la mobilité des nœuds dans les réseaux Ad-hoc et de capteurs mobiles. Pour cette raison, les protocoles de routage les plus étudiés pour ce type de réseaux sont les protocoles de routage géographique car ils permettent d'éviter la surcharge d'informations échangées entre les nœuds qui cherchent à obtenir la topologie du réseau ou à construire les tables de routage.

Ce protocole de routage géographique se base sur le fait que tous les nœuds connaissent leur position, par exemple, grâce à un équipement GPS (Global Positioning System) ou encore par un système de positionnement distribué [51].

3.3.2.3 Le protocole DSDV

DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector) [52] est un protocole de routage Table-driven. Chaque nœud dans DSDV garde une table de routage qui donne pour chaque destination accessible dans le réseau :

- Le nœud voisin à utilisé pour atteindre cette destination,
- Un numéro de séquence qui est envoyé par le nœud destinataire et qui permet de distinguer les nouvelles routes des anciennes,

- Le nombre de sauts (nœuds intermédiaires) pour atteindre cette destination.

Périodiquement chaque nœud dans le réseau diffuse par inondation un paquet de mise à jour des tables de routage qui inclue les destinations accessibles et le nombre de sauts exigés pour atteindre chaque destination avec le numéro de séquence lié à chaque route. Des paquets de mise à jour sont aussi diffusés immédiatement s'il y a un changement dans la topologie du réseau afin de propager les informations de routage aussi rapidement que possible

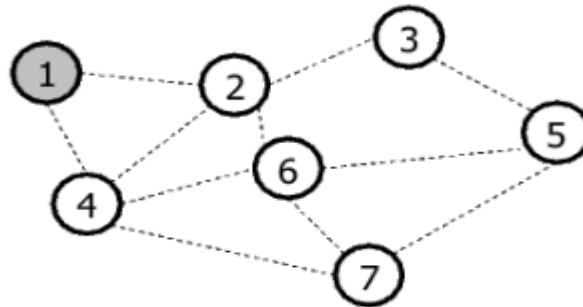


Figure 3.8: Fonctionnement du protocole DSDV.

A la réception d'un paquet de mise à jour, chaque nœud le compare avec les informations existantes dans sa table de routage. Les routes les plus récentes (qui ont le plus grand numéro de séquence) avec la distance la plus courte sont gardées, les autres sont simplement ignorées.

DSDV fournit à tout moment des routes valables vers toutes les destinations du réseau, mais l'inondation des paquets de mise à jour (périodique et en cas de changement de topologie) cause une charge de contrôle importante au réseau.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu la définition de routage dans les RCSF, nous étudier les différentes techniques de l'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous des contraintes de couverture et de connectivité et les problématiques liées à ces techniques. Dans la suite nous nous intéressons plus aux protocoles de routage qui sont basés sur l'algorithme tabou.

Chapitre IV

la recherche

Tabou

4.1 Introduction

Dans certains problèmes d'optimisation, les méthodes de résolutions dites exactes, ne permettent pas trouver la solution optimale dans une durée de temps raisonnable. C'est l'une des principales raisons qui ont contribué à la naissance des métaheuristiques. En effet cette famille d'algorithmes permet de résoudre des problèmes d'optimisations complexes face auxquels les méthodes classiques manquent d'efficacité. Cependant ces algorithmes de recherche ne peuvent garantir l'optimalité de la solution trouvée.

4.2 Méthodes Métaheuristiques

La complexité du problème d'optimisation de l'écoulement de puissance surtout dans un environnement de marché d'électricité libre, avec l'apparition de nouvelles contraintes en matière de réduction des émissions de gaz polluant (Protocole de Kyoto, 2005) et l'utilisation de sources d'énergies renouvelables, fait en sorte qu'il est souvent difficile d'utiliser des méthodes exactes de solution compte tenu du manque de flexibilité des méthodes classiques pour intégrer diverses contraintes spécifiques [53]. Ces problèmes ont donné lieu au développement d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation nommées métaheuristiques, celles-ci marquent une grande révolution dans le domaine d'optimisation. En effet, elles s'appliquent à toutes sortes de problèmes combinatoires, et elles peuvent également s'adapter aux problèmes continus.

Les méthodes métaheuristiques apparues à partir des années 1980 [54], permettent de trouver une solution de bonne qualité en un temps de calcul en général raisonnable, sans garantir l'optimalité de la solution obtenue. Les méthodes heuristiques peuvent être divisées en deux classes. Il y a, d'une part, les algorithmes spécifiques à un problème donné qui utilisent des connaissances du domaine, et d'autre part les algorithmes généraux qui peuvent être utilisés pour une grande variété de problèmes.

4.2.1 Définition des Méthodes Métaheuristiques

Les métaheuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes Génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims particulaires).

Ces techniques métaheuristiques peuvent être classées en deux groupes : les méthodes à population de solutions connues sous le nom d'algorithmes évolutionnaires comme les algorithmes génétiques...etc., ainsi que les méthodes à solution unique comme le recuit simulé. Les méthodes métaheuristiques ont prouvé leurs efficacités dans le domaine de l'optimisation mono-objectif. Actuellement les recherches qui utilisent ces algorithmes sont développées pour la résolution des problèmes d'optimisation multi objectif, en tenant compte de plusieurs contraintes et de nouvelles configurations des réseaux électriques surtout à l'associations de sources des énergies renouvelables où la résolution de ce system complexe est un défi .

4.2.1.1 Principe de voisinage

Sans conteste, le principe général le plus largement utilisé dans l'élaboration des métaheuristiques est celui de voisinage. À chaque solution s du problème, on associe un sous ensemble $V(S)$ de solutions. [53] Une méthode de voisinage débute généralement avec une configuration initiale s à laquelle un processus itératif est appliqué. Il cherche à améliorer la configuration courante en la remplaçant par une de ses voisines en tenant compte de la fonction objective. Ce processus s'arrête et retourne à la meilleur solution trouvée lorsque le critère d'arrêt est atteint. Cette condition d'arrêt concerne généralement une limite sur le nombre d'itérations ou sur l'objectif à réaliser. Les méthodes de voisinage diffèrent principalement entre elles par le voisinage utilisé et la stratégie de parcours d'une solution voisine [55].

4.2.2 L'algorithme tabou

4.2.2.1 Définition

La métaheuristique taboue est une méthode de voisinage, utilisant des techniques qui permettent d'éviter les optima locaux et les cycles. Cette métaheuristique a été développée par Glover en 1989 et elle connaît beaucoup de succès grâce aux résultats très satisfaisants obtenus sur un grand nombre de problèmes. L'objectif de cette métaheuristique est la diversification à court terme, en utilisant un mécanisme appelé liste taboue [56].

4.2.2.2 Liste tabou

Un élément fondamental de la recherche tabou est l'utilisation d'une mémoire flexible, à court terme, qui garde une certaine trace des dernières opérations passées. On peut y stocker des informations pertinentes à certaines étapes de la recherche pour en profiter ultérieurement. Cette liste permet d'empêcher les blocages dans les minima locaux en interdisant de passer à nouveau sur des configurations de l'espace de recherche précédemment visitées.

4.2.2.3 Structure algorithmique

Dans le cadre d'un travail de recherche, il est impératif de passer à une description formelle et rigoureuse de cet algorithme. Dans cette optique, on s'est inspiré de la description d'Alain Hertz [57] de l'algorithme Tabou qu'on présente comme suit :

❖ Définition du problème :

Soit N l'ensemble de toutes les solutions possibles, et F une fonction à optimiser et qui détermine la valeur $F(S)$ de toute solution S dans N .

Le problème à résoudre est donc le suivant :

$$\text{Max } F(S)$$

$$\text{Sous contraintes : } S \in N$$

On appelle voisinage, la fonction V qui associe un sous-ensemble de N à toute solution $S \in N$.

Ainsi un voisin de S est toute solution $S' \in V(S)$.

Une solution $S \in N$ est considérée comme étant un maximum local dans un voisinage V si : $F(S') \leq F(S) \forall S' \in V(S)$.

Une solution $S \in N$ est dite un maximum global si : $F(S') \leq F(S) \forall S' \in N$

❖ Principe :

Durant l'évolution itérative de la recherche Tabou, cet algorithme choisit à chaque itération la meilleure solution $S' \in V(S)$, même si $F(S) > F(S')$. Quand la recherche atteint un maximum local S dans un voisinage V , l'algorithme Tabou sera contraint de se déplacer vers une solution S' avec $F(S) > F(S')$. Dans certain cas, il arrive que le voisinage de la solution S' contienne la solution $S \in V(S')$. Alors, même si la solution S est un maximum local dans le voisinage V , il ne faut surtout pas revenir immédiatement à S ,

sinon la recherche se trouverait piégée à tourner en rond entre S et S' . Afin d'éviter ce problème, l'algorithme Tabou fait intervenir une liste T baptisée liste taboue. Cette liste permet de mémoriser durant un nombre limité d'itérations (mémoire à court terme), les dernières solutions visitées et d'interdire tout déplacement vers ces solutions. On appelle toute solution figurant dans la liste T une solution taboue.

❖ Algorithme de la recherche Tabou

Soit :

- S : Solution courante;
- S^* : Meilleure solution rencontrée depuis le début de la recherche.

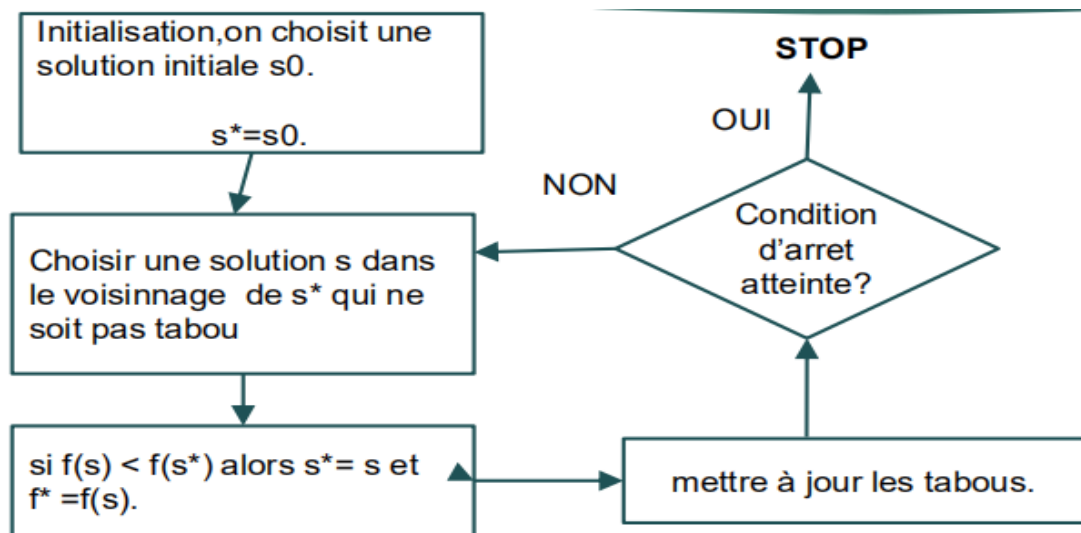


Figure 4.1 : Organigramme du modèle de base de l'algorithme tabou.

À part le fait que l'algorithme Tabou a besoin de mémoriser la liste taboue pour éviter de cycler, la RT mémorise aussi tout au long de son évolution la meilleure solution S^* rencontrée. En effet, à la fin de la recherche, lorsque le critère d'arrêt est vérifié, S^* nous permettra de retrouver la meilleure solution visitée depuis le lancement de la recherche.

Par ailleurs, l'analyse de l'algorithme présenté dans cette section nous permet de déceler rapidement trois critères dont la configuration influe considérablement sur les résultats de la recherche en qualité et en temps. Le premier étant la taille de la liste taboue. Malgré l'apport positif que fournit cette liste, un mauvais paramétrage de sa longueur risque de lui faire perdre toute son utilité. D'un côté, plus la taille de cette liste est petite,

plus le phénomène de cyclage reprend vie. D'un autre côté, une liste taboue trop longue limitera énormément l'espace de recherche. Face à ce dilemme, il est généralement conseillé de procéder à une étude empirique dans l'optique de fixer la bonne taille de la liste taboue.

Le second élément à définir est la fonction V qui détermine le voisinage. La détermination de cette fonction a une grande influence sur l'évolution de la recherche. En effet, une mauvaise définition du voisinage pourrait ralentir considérablement l'évolution de l'algorithme. Donc la question à laquelle il faudra répondre pour définir le voisinage est : partant d'une solution S , comment choisir le sous ensemble des solutions $S' \in V(S)$?

Finalement le troisième élément dont la configuration est assez fragile, est la condition d'arrêt. Ce dernier joue un rôle essentiel du point de vue de la qualité de la solution et du point de vue de son temps de réponse. On se retrouve ici face à un second dilemme : une condition d'arrêt rapidement atteignable ne laissera pas assez de temps au Tabou pour trouver l'optimum global recherché. À l'inverse, un critère d'arrêt peu probable prolonge trop longtemps la recherche même si l'optimum absolu est atteint.

4.2.2.4 Techniques d'améliorations

Dans cette section, nous présentons les trois principales techniques permettant d'améliorer les performances et l'efficacité de l'algorithme Tabou

❖ Critère d'aspiration

Le critère d'aspiration fût introduit la première fois en 1986 par Fred Glover [58]. En 1989, il publie un autre article [59] sur son algorithme Tabou où il explique entre autre le fonctionnement du critère d'aspiration. L'idée derrière cette technique amélioratrice est d'accepter certains mouvements récemment effectués et qui en temps normal, ne seraient pas acceptés par les règles du Tabou. Le fait qu'on gère ici des mouvements plutôt que des solutions, nous permet de mémoriser uniquement ces mouvements au lieu de mémoriser des solutions complètes qui alourdisent considérablement la recherche. Cette problématique est principalement rencontrée lors de la vérification de présence d'une solution voisine dans la liste taboue. Mais la mémorisation des mouvements ne présente pas que des avantages. Le fait de mémoriser des mouvements peut amener à visiter la même solution plusieurs fois et cela sans enfreindre l'interdiction qu'impose la liste

taboue. Un autre inconvénient au fait de mémoriser des mouvements est qu'il se peut que la liste taboue ne permette pas de visiter des solutions qui n'ont jamais été explorées, même si celles-ci peuvent être des optimums. Face à ce dernier défaut relatif à la mémorisation des mouvements, l'utilisation du critère d'aspiration est d'une grande utilité. En effet, en libérant de la liste taboue uniquement les mouvements satisfaisant le critère d'aspiration, on peut trouver des solutions meilleures que la meilleure solution rencontrée depuis le début. Donc, le critère d'aspiration peut décider quand un mouvement est bénéfique et donne ainsi la permission à l'algorithme d'entreprendre ce mouvement même s'il est interdit [58].

❖ **Technique de diversification**

Fred Glover nous explique bien cette technique dans son article [60]. En résumé ce processus consiste à effectuer des mouvements visant à varier l'échantillon de recherche. En effet il s'avère intéressant de diversifier les zones de recherches dans l'espoir de couvrir le plus possible de zones dans l'espace N . Généralement, cette technique est appelée lorsque la recherche se trouve bloquée aux alentours d'un optimum local. Grâce à la diversification, une solution sera générée, à partir de laquelle l'algorithme reprendra sa recherche.

❖ **Technique d'intensification**

Inversement à la technique de diversification, l'intensification effectue des mouvements permettant d'améliorer rapidement la solution. En effet, en favorisant la recherche aux alentours des zones les plus prometteuses, ce processus peut amener à des solutions de meilleure qualité. Comme son nom l'indique, cette technique intensifie et localise plutôt la recherche tout prêt des solutions avantageuses dans l'espoir de les améliorer et d'atteindre des solutions meilleures que S^* .

4.2.2.5 Les types de mémoire

Un algorithme de Recherche Tabou comporte trois types de mémoire [61]:

- **La mémoire à court terme** : il s'agit de la liste taboue traditionnelle. Le principe est d'éviter de faire des mouvements inverses pour ne pas régénérer des solutions déjà rencontrées. La taille des listes taboues est une donnée critique. C'est pour cela qu'elle peut être fixe ou variable voir même adaptative. Dans ce dernier cas, la taille évolue en fonction des solutions qu'elle contient et du voisinage utilisé

- **la mémoire à moyen terme** : cette mémoire traduit le principe d'intensification pour la Recherche Tabou. Le but est de permettre de tirer la recherche vers des solutions ayant de bonnes propriétés. Le problème est bien sûr de trouver ses bonnes propriétés. Ce type de mémoire est forcément dédié au problème étudié et il faut pouvoir extraire des meilleures solutions trouvées l'information commune qui va guider la recherche
- **la mémoire à long terme** : il s'agit du mécanisme de diversification. Le principe est de pouvoir diriger la recherche vers les régions non encore explorées de l'espace de recherche. Cette étape de diversification est appliquée de temps en temps pour permettre de relancer la recherche.

L'utilisation de ces trois mémoires n'améliore pas à coup sûr la recherche. En effet, l'efficacité des processus d'intensification et de diversification sont intimement liés à la forme du paysage de la fonction d'évaluation utilisée. En effet, si le paysage ressemble à une vallée, un processus de diversification n'a pas d'intérêt et inversement si le paysage est un ensemble d'optima locaux, la phase d'intensification risque d'astreindre la recherche dans certaines zones de l'espace. Donc une étude préalable du paysage du problème doit permettre des choix intelligents du paramétrage de ce type d'algorithme.

4.3 Les travaux liés

Travaux	Tabou_GA	Tabou_search	TABOU_COL
Paramètres			
Vecteur de solution	Composé des nœuds CHs	Composé des nœuds CHs	Composé des nœuds voisins des CHs

Voisinage	Le voisin avec l'estime la plus remarquable est vérifiée comme le nouveau meilleur arrangement dans la liste TABOU	Le voisinage composer a trois type de mouvements sont distingués : -mouvement implique un nœud ordinaire. - mouvement implique un nœud actif. - mouvement implique une tête de cluster.	Le voisinage considéré est le changement de la valeur d'une seule variable
Liste tabou	Nouveau meilleur arrangement placer dans dans la liste TABOU	Propose deux liste tabou : -une liste de réaffectation -une liste de réélection	Enregistre tous les solutions mouvements inverses des mouvements déjà effectués
Fonction de fitness	/	La fonction contient deux parties : - la premier est égale au total des couts du cluster -le deuxième terme représente la pénalité causée par le déplacement	Utiliser deux fonctions : F1 : qui dénombre les conflits dans la solution c.-à-d. la violation des contraintes. F2 : qui représente le cout réel d'affectation des variables.
Critère d'arrêt	Nombre d'itérations	Nombre d'itérations	Nombre d'itérations
Critère de sélection des CHs	aléatoire	aléatoire	Leach

Nature du réseau	hétérogène	homogène	homogène
Outil utilisé	MATLAB 2013	C++	C++
Comparaison avec	MSEEC, Tabou_MSEEC	CPLEX ,TAG, centralizedapproch,distribu tedapproach, simulated annealing	DIMACS

Tableau 4.1: Tableau des travaux liés

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le concept de métaheuristiques , Puis nous avons détaillé le mécanisme de l'une des plus importantes métaheuristiques d'aujourd'hui qui utilisée pour résoudre des problèmes complexes et/ou de très grande taille appelée la méthode tabou .

Chapitre V

Résultat et discussion

5.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre nous allons évaluer le nouveau protocole Tabou-LEACH proposé en adaptant l'algorithme de recherche tabou pour bien minimiser la distance totale de transmission dans le réseau à l'aide de clustering ce qui réduirait aussi le nombre de transmission, et avec l'agrégation des données dans le RCSF par conséquent moins d'énergie consommé.

Les performances de notre protocole et leur efficacité dans la consommation énergétique sera comparé avec le célèbre protocole de routage LEACH.

5.2 Le protocole LEACH

Le mécanisme de clustering LEACH [64]. Selon ce mécanisme, chaque nœud choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à un seuil $T(n)$, le nœud devient CH. Le seuil est calculé comme suit :

$$T(n) = \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{P})} \text{ si } n \in G, \text{ et } 0 \text{ sinon} \quad (5.1)$$

Où P est le pourcentage de CHs parmi tous les nœuds, r est le numéro de l'itération et G est l'ensemble de nœuds qui n'ont pas été élus CHs pour les derniers $1/P$ itérations. Les autres nœuds rejoignent le cluster ayant le signal le plus élevé en utilisant une communication à un saut. Si un nœud est loin de tous les CHs, il s'élit CH. Au niveau d'un cluster, les nœuds transmettent leurs données au CH en utilisant TDMA (Time Division Medium Access).

5.3 Le mécanisme de mise en veille

Dans le cas de la couverture de zone par seuil, un nœud reste actif si aucun autre n'est actif dans un rayon d'autour de lui. Un nœud actif reste jusqu'au bout. Nous nous concentrons donc sur des algorithmes localisés.

Un algorithme simple et localisé a été proposé en [65]. Initialement, tous les nœuds sont en mode passif. Périodiquement, chaque capteur s'active pour envoyer un message de sondage. Tous les nœuds actifs dans un rayon de communication RT (identique pour chaque nœud) le reçoit. Chacun observe alors si sa distance par rapport à l'émetteur est inférieure à une distance R, également identique pour chaque nœud. Ce calcul peut être effectué à partir de la puissance du signal reçu ou des délais de transmission. Si le capteur se trouve à une distance inférieure à R, il répond à l'émetteur, lui permettant ainsi de

repasser en mode passif. Sinon, aucun message n'est envoyé et le capteur émetteur décide de devenir actif. Il le reste alors jusqu'à épuisement total de ses batteries.

Un mécanisme de mise en veille alternative assurant une couverture totale est proposée en [65]. Dans une première phase de découverte du voisinage, des messages HELLO sont émis tour à tour par chacun des nœuds. Ensuite, chacun décide d'un temps d'attente aléatoire au bout duquel il calcule la couverture fournie par ses voisins. S'il décide de rester actif, aucun message n'est envoyé. En revanche, en cas de couverture totale de sa propre zone de surveillance, il décide d'être inactif et envoie un message de retrait à ses voisins. Ceux n'ayant pas encore décidé mettent à jour leur table de voisinage. Les résultats validés sous l'hypothèse du disque unitaire ont montré que cet algorithme permet de diminuer considérablement le nombre de nœuds actifs tout en conservant une couverture totale du réseau.

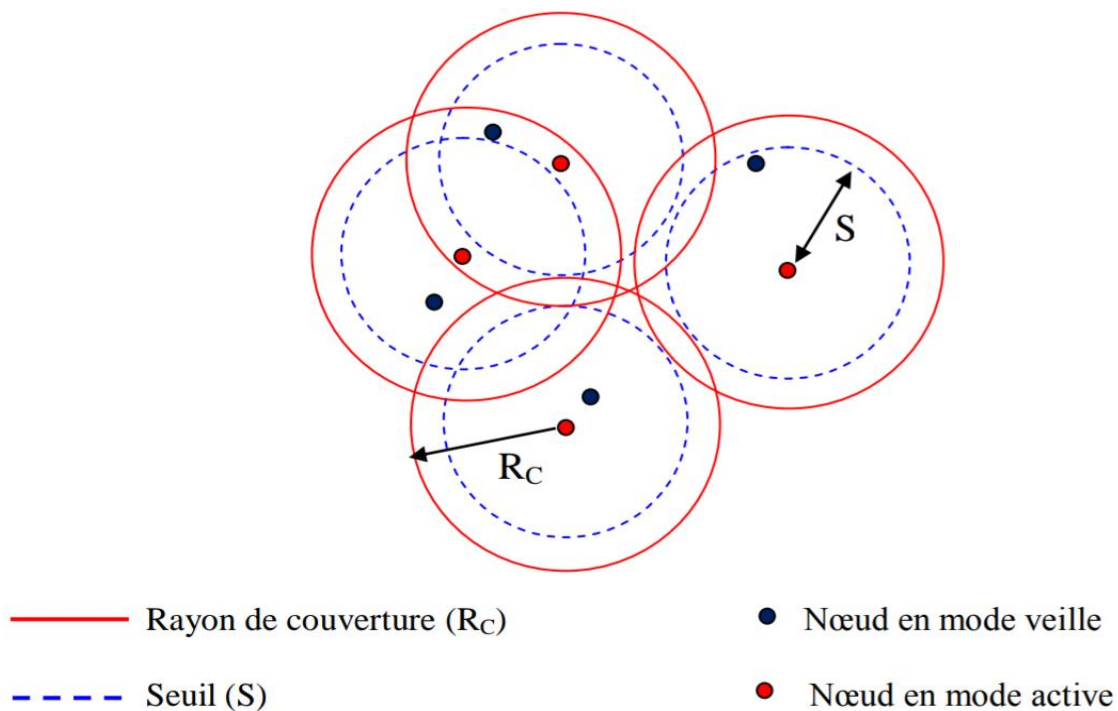


Figure 5.1: Mécanisme de mise en veille.

L'algorithme de mise en veille avec le seuil S est le suivant :

```
Entrée :  $G(V, E), v, u, S, B$   
Pour tout  $v \in V$  faire  
   $v.\text{état} \leftarrow \text{Inactive}$   
Fin pour  
Pour tout  $v \in V$  faire  
   $B \leftarrow \text{Faux}$   
  Pour tout  $u \in V$  faire  
    Si  $v \neq u$  et  $\text{dist}(v, u) \leq S$  et  $u.\text{étatActive}$  alors  
       $B \leftarrow \text{Vrai}$   
    Break  
  Fin si  
Fin pour  
  Si  $B = \text{Faux}$  alors  
     $v.\text{état} \leftarrow \text{Active}$   
  Fin si  
Fin pour
```

L'algorithme de mise en veille

5.4 La recherche tabou

la recherche tabou est une méthode de recherche locale avancé qui fait appelle à ensemble de règles et de mécanisme généraux pour guidé la recherche de manière intelligent

❖ Algorithme de la recherche Tabou

Soit :

- S : Solution courante;
- S* : Meilleure solution rencontrée depuis le début de la recherche.

1. Choisir une solution $S \in N$, poser $T := \emptyset$ et $S^* := S$;
2. Tant qu'aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire
3. Déterminer une solution S' qui minimise $F(S')$ dans $V^T(S)$
Avec $V^T(S) = \{ S' \in V(S) \text{ tel que } S' \notin T \}$
4. Si $F(S') < F(S^*)$ alors poser $S^* := S'$
5. Poser $S := S'$ et mettre à jour T
6. Fin du tant que

5.4.1 définition des solutions

dans cette section, nous présentons la forme générale des solutions. Ensuite, nous expliquerons le rôle de chacune des différentes solutions spécifiques qui ont été utilisées lors de l'implémentation du programme.

5.4.1.1 La solution initiale

Soit S_0 la solution initiale de la recherche Tabou. C'est à partir de cette solution de départ que le Tabou commencera à explorer divers voisinages jusqu'à atteindre d'autres solutions de meilleure qualité..

5.4.1.2 La solution S_k

Vu que la recherche Tabou est une recherche itérative, on note S_k la solution courante à l'itération k . Une solution S_k est dite réalisable lorsque son coût total est inférieur à un budget fixé et que son nombre d'impressions est supérieur à un nombre d'impressions minimal fixé lui aussi.

5.4.1.3 La solution S^*

La solution S^* est la meilleure solution réalisable rencontrée depuis le début de la recherche. À chaque itération, le programme vérifie si S_k est une solution réalisable et si le score $F(S_k)$ de S_k est plus petite que celui de S^* . Si ces deux conditions sont satisfaites, S^* est mis à jour avec le contenu de la solution S_k .

5.4.1.4 La solution S_{best}

Cette solution est très semblable à S^* . La seule différence entre ces deux solutions est que S_{Best} peut contenir une solution non réalisable. Donc, l'algorithme compare uniquement le score de la solution courante à celui de S_{Best} . Si le score de l'une des solutions du voisinage est plus petite que le score de S_{Best} , alors cette dernière sera mise à jour. L'idée derrière S_{Best} est de poursuivre encore la recherche aux alentours de cette bonne solution malgré sa non réalisabilité dans l'espoir de trouver une solution réalisable S^* tout près de S_{Best} .

5.4.2 Formalisation et modélisation

$$S_i = \begin{cases} 0 & i \text{ est un noeud mort} \\ -1 & i \text{ est un noeud en vielle} \\ n + 1 & i \text{ est un noeud cluster head} \\ c & i \text{ est un noeud normal} \end{cases}$$

- la zone de capteur d'un nœud capteur est un espace circulaire centré en ce nœud avec un rayon R .
- la zone de capteur d'un nœud capteur est un espace circulaire centré en ce nœud avec un rayon r .
- $R \geq 2r$: un condition qui assure la connectivité du réseau.
- Deux nœuds capteurs ne peuvent être déployés exactement dans une même position (x,y) de l'espace 2D.
- **RV** : rayon de voisinage tel que $RV < r$.

- **RNS (s)**: ensemble de voisins de communication du nœud u , est défini formellement par :
$$\mathbf{RNS}(s) = \{v \in V / d(s, v) \leq R \}$$
- **CNS(s)**: ensemble de voisins de couverture du nœud u , est défini formellement par :
$$\mathbf{CNS}(s) = \{v \in V / d(s, v) \leq r \}$$
- **INS(s)** : ensemble de voisins de couverture et de communication du nœud u , est défini formellement par :
$$\mathbf{INS}(s) = \mathbf{RNS}(s) \cap \mathbf{CNS}(s)$$
- **Taille du RCSF** : le nombre de nœuds du réseau de capteur sans fils n .
- **Ensemble des nœuds du RCSF**: $E = \{1, 2, \dots, n\}$.
- **Domaine des valeurs admissibles**: $\mathcal{D} = \{-1, 0, 1, \dots, n, n + 1\}$.
- **Solution**: $s = (s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n)$, telle que chaque $s_i \in \mathcal{D}$.
- **Espace de recherche**: $S = \{s(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n) \in \mathcal{D}^n \mid \forall i = \overline{1, n}, s_{s_i} = n + 1\}$.
- **Voisinage d'un nœud** : $VNS(u) = \{v \in E \mid dist(u, v) \leq RV\}$, où
 - $dist$ est la distance euclidienne,
 - RV est le rayon de voisinage, ($RV \leq r$)
 - $VNS(u)$ est l'ensemble des nœud qui partagent la même sous-zone de captage avec le nœud u .
- **Espace de recherche dans Tabu-search**:

$$X(s) = \{s'(s'_1, s'_2, \dots, s'_i, \dots, s'_n) \in S \mid s'_i \in VNS_{active}(s_i)\},$$
 - $VNS_{active}(u)$ est l'ensemble des nœuds actives qui partagent la même sous-zone de captage avec le nœud u .
- **Taille de l'espace de recherche**

Par exemple : Pour une solutions s , supposons ayant 30 nœuds en état de veille et que chaque nœud possède 5 voisins alors le nombre de solutions voisins est égale à 5^{30} veut dire **931322574615479000000** solutions possible.
- **Distance entre deux solutions** : **distance** est la fonction définie comme suit:

$$distance: S \times S \rightarrow \mathbb{R}^+$$

telle que :

distance(s, s')

$$= \left| \sum_{i=1}^n \text{dist}(i, s_i) + \text{dist}(s_i, s_{s_i}) - \sum_{i=1}^n \text{dist}(i, s'_i) + \text{dist}(s'_i, s'_{s'_i}) \right|$$

avec

$$\text{dist}(i, j) = \begin{cases} \|\vec{i} - \vec{j}\| & \text{si } j \notin \{-1, 0\} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.2)$$

\vec{i} est le vecteur du nœuds i dans le repère de la zone de surveillance,

\vec{j} est le vecteur du nœuds j dans le repère de la zone de surveillance.

- **Voisinage d'une solutions :**

$$N(s) = \{s' \in X(s) \mid \text{distance}(s, s') \leq d\}$$

5.4.2.1 Sélection du voisinage

Pour des raisons de mémoire et de temps de calcul, le voisinage ne sera pas totalement généré durant chaque itération. Le programme génère un voisin S_v puis l'évalue immédiatement avant de générer le prochain voisin. Si le score de ce voisin est meilleur que celui de S^* , et si de plus ce voisin S_v , alors on copie S_v dans S^* et on interrompt la génération du voisinage.

Le processus de génération du voisinage sera stoppé au premier voisin non tabou qui améliore le score de S_{Best} . Dans le cas échéant, l'algorithme n'aura d'autre choix que de parcourir tous les voisins et d'en sélectionner le meilleur voisin non tabou, même s'il détériore le score de la solution courante.

5.4.2.2 Fonction objectif

La fonction de fitness est généralement une fonction mathématique qui renvoie un score ou les critères d'aspiration sont satisfaits par exemple un critère d'aspiration pourrait

être considéré comme un nouvel espace de recherche est trouvé

$$\begin{array}{ccc} \text{Fitness} & \longrightarrow & \mathbb{R}^+ \\ S & \longrightarrow & \text{fitness}(s) \end{array}$$

$$\text{Fitness}(s) = (\text{energysolution} / (\text{NpaquetsToCH} + \text{NpaquetsToBS})) / \text{Nnoudactive} \quad (5.3)$$

5.4.2.3 La liste tabou

Le meilleur candidat local a une valeur de fitness Plus bas que le meilleur actuel il est défini comme le nouveau meilleur. Le meilleur candidat local est toujours ajouté à la liste tabou et si la liste tabou est pleine, certains éléments pourront expirer en général, les

éléments expirent de la liste ans le même ordre ou ils sont ajoutés. La procédure sélectionnera le meilleur candidat local (bien qu'il ait une moins bonne forme que le S_{best} afin d'échapper a l'optimum local)

5.5 Implémentation et discussion

5.5.1 Langage de programmation utilisé

Nous choisissons l'environnement de programmation MATLAB version 2017 pour implémenter les deux protocoles LEACH et tabou-LEACH. Le choix du MATLAB était pour plusieurs raisons :

- MATLAB offre un certain nombre de fonctionnalités pour la documentation et le partage du travail.
- On peut aussi intégrer le code MATLAB avec d'autres langages et applications, et distribuer les algorithmes et applications MATLAB.

Les principales fonctionnalités du MATLAB sont :

- Langage de haut niveau pour le calcul scientifique.
- Environnement de développement pour la gestion du code, des fichiers et des données.
- Fonctions mathématiques pour l'algèbre linéaire, les statistiques, l'analyse de Fourier, le filtrage, l'optimisation et l'intégration numérique.
- Fonctions graphiques 2-D et 3-D pour la visualisation des données.
- Outils pour la construction d'interfaces graphiques personnalisées.
- Fonctions pour l'intégration d'algorithmes développés en langage MATLAB, dans des applications et langages externes, tels que C/C++, Fortran, Java, COM et Microsoft Excel [64].
- Nous utilisons un appareil des caractéristiques suivant :

processeur	Mémoire RAM	Le système d'exploitation	Type de système
Intel() Core(TM) i7- 6500U CPU@2.50GHz 2.59GHz	8.00 Go	Windows 10	Système d'exploitation 64 bits, processeur x 64

Tableau 5.1 : caractéristiques de l'appareil.



Figure 5.2: L'interface de MATLAB

5.5.2 Le but de notre application

On va établir un système permettant de simuler la surveillance d'un réseau de capteur sans fil, afin d'en permettre l'évaluation des algorithmes (LEACH, et l'algorithme Tabou-LEACH) pour obtenir un meilleur mécanisme pour la conservation d'énergie.

5.5.3 Le modèle énergétique

Un capteur utilise son énergie pour réaliser trois actions principales : l'acquisition, la communication et le traitement des données. Pour transmettre un message de k bits sur une distance de d mètres, l'émetteur consomme [64]:

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX}(l) + E_{TX_amp}(k, d) \quad (5.4)$$

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} k \cdot E_{elec}(k, d) + k \cdot \varepsilon_{friss} d^2 & \text{si } d < d_{crossover} \\ k \cdot E_{elec}(k, d) + k \cdot \varepsilon_{row_ray_amp} d^2 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.5)$$

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

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx_elec}(k) = k \cdot E_{elec} \quad (5.6)$$

Avec

E_{elec} : Énergie de transmission/réception électronique ;

k : Taille d'un message ;

d : Distance entre l'émetteur et le récepteur ;

E_{TX-amp} : Énergie d'amplification ;

ε_{amp} : Facteur d'amplification ;

$d_{crossover}$: Distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur.

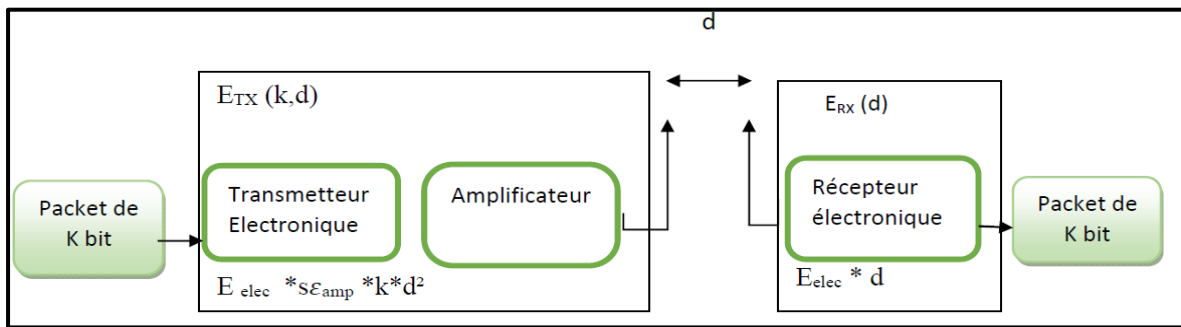


Figure 5.3 : Modèle de consommation d'énergie

5.2.3.1 Les étapes de la simulation

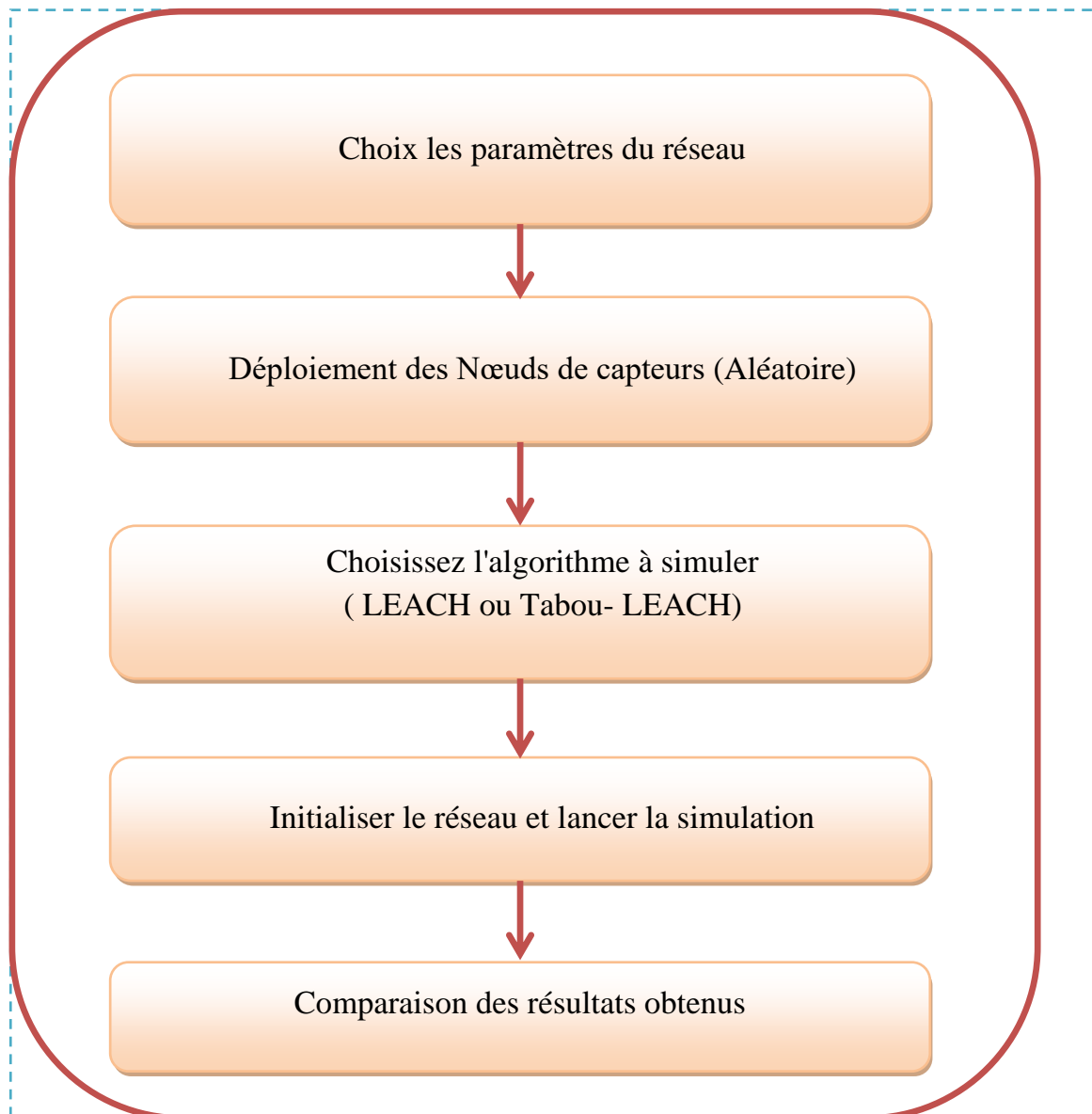


Figure 5.4: Les étapes de simulation

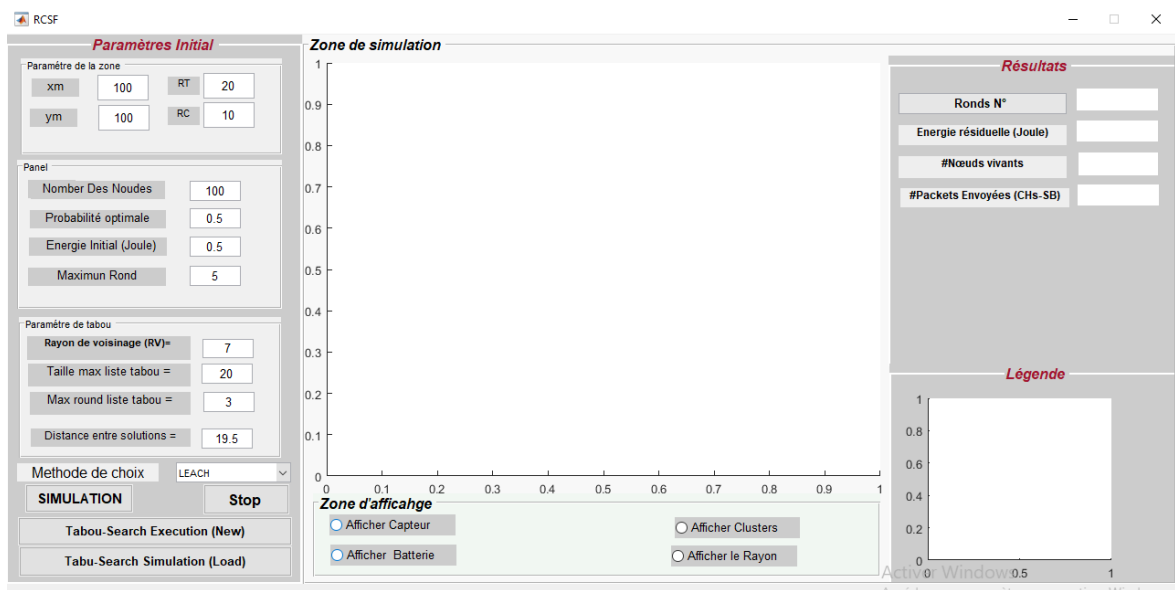


Figure 5.5: L'interface de simulation

5.5.4 Choix du paramètre du réseau :

Le choix du paramètre réseau est effectué à travers l'onglet « Capteur » pour choisir :

a. Déploiement des nœuds capteurs :

- Déploiement aléatoire : Chaque nœud capteur prend un emplacement (x, y) purement aléatoire, de tel sort que chaque capteur occupe une position différentes du précédent.

b. Choix les nombres des capteurs à déployer

5.5.5 L'Affichage des informations des capteurs :

Pour chaque nœud capteur déployé, plusieurs informations peuvent être affichées à partir de la zone d'affichage ». Ces informations sont :

- **Le rayon de connectivité** : c'est la portée de transmission d'un nœud capteurs.
- **Les clusters** : c'est l'ensemble des lignes qui représente les liens de connectivité entre les capteurs et leurs CH.
- **Les numéros des capteurs** : le numéro de chaque capteur est affiché au-dessus de celle-ci.
- **L'énergie** : permet d'afficher l'énergie de chaque capteur au-dessous de celle-ci.

La figure 5.6 nous montre le résultat d'affichage de toutes les informations précédemment décrites, dans le cas de déploiement de 100 capteurs.

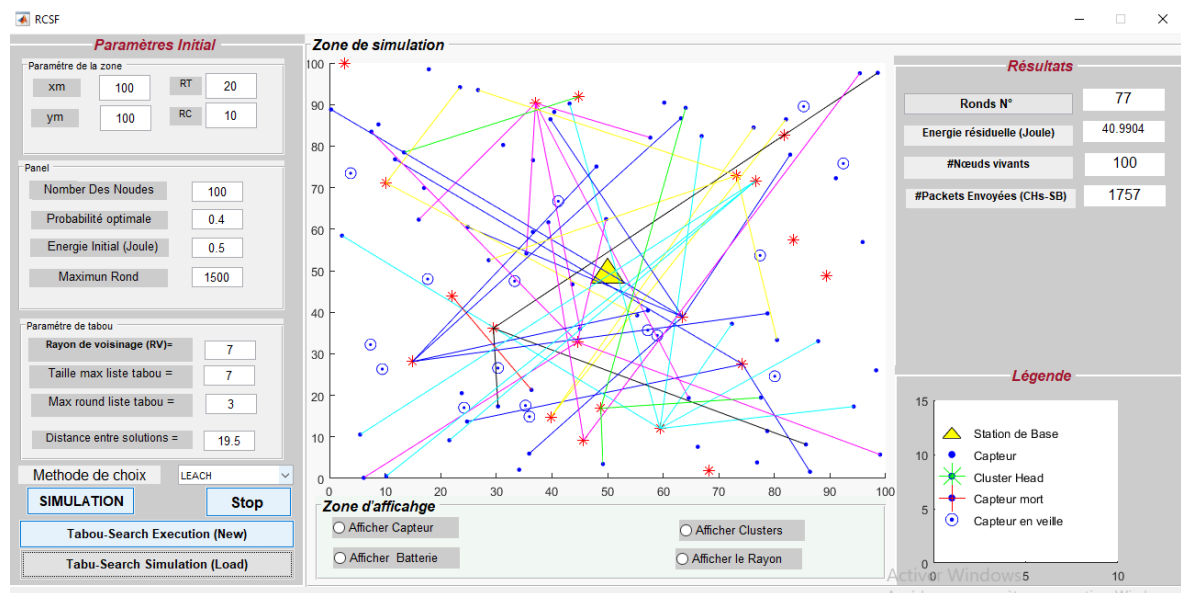


Figure 5.6: Affichage des informations des capteurs

5.5.6 Exécution de protocole LEACH et protocole tabou-LEACH

5.5.6.1 Simulation des protocoles :

Dans cette phase on présente la simulation des deux protocoles. On commence par l'application du protocole LEACH avec un rayon de connectivité fixe sur un réseau de capteur sans fil.

Par la suite on simule le même réseau avec le protocole tabou-LEACH afin de faire une comparaison entre les deux protocoles.

Note :

- Les nœuds capteurs ayant la couleur vert sont des « Cluster Head »
- Les nœuds capteurs ayant la couleur rouge sont les nœuds MORT
- Les nœuds capteurs ayant la couleur Bleu sont les nœuds NORMALE.
- Le triangle couleur jaune est station de basse.

5.5.6.2 Les paramètres de simulation

Le scénario de cette simulation est:

- Les Nœuds de capteurs sont répartis au hasard dans une zone carrée.
- Les Nœuds de capteurs sont homogènes et ont un numéro d'identification unique à travers le réseau,
- L'énergie des nœuds de capteurs sont limités.
- L'emplacement des nœuds sont fixés une fois sont déployés.
- La station de base est dans le centre de la zone de simulation avec un emplacement fixe.
- Les Nœuds CHs communiquent avec la station de base via un seul saut ; Les paramètres spécifiques sont présentés dans le tableau 5.2 suivant :

Variables	Valeur	Description
La surface de réseau	100 m*100m	/
Le nombre de nœuds	100	/
CH pourcentage p	0.5	Probabilité optimale
L'énergie Initiale	0.5 J	/
Localisation de la SB	(50,50)	/
E_{DA}	5nJ/bit	Energie pour l'agrégation de données
E_{fs}	10pJ/bit/m ²	Amplificateur d'émission pour $d < d_0$
E_{LEC}	50nJ/bit	l'énergie électronique
E_{mp}	0.0013pJ/bit/m ⁴	amplificateur d'émission pour $d \geq d_0$
packetLength	6400 bit	La taille des paquets de données sans en-tête
ctrpacketLength	200 bit	paquet de diffusion (broadcast)
d_0	87	distance de seuil

Tableau 5.2 : Paramètres de simulation

5.6.6.3 Les résultats de simulation

Figure 5.7 illustre la comparaison entre les deux protocoles en termes de nombre des trames délivrés à la station de base par rapport le nombre de rond.

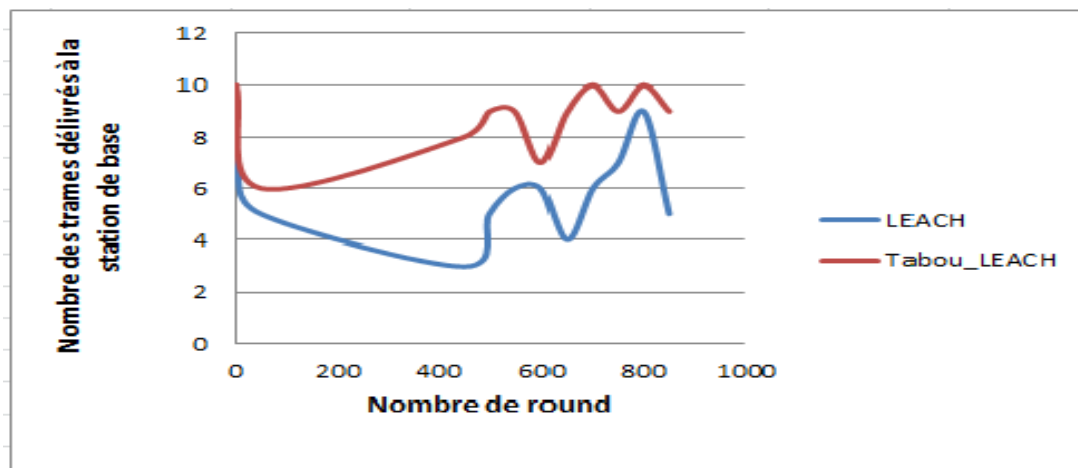


Figure 5.7: Nombre des trames délivrés à la station de base

On remarque dans la figure au-dessus que le protocole Tabou-LEACH a plus de trames délivrées par rapport au protocole LEACH. Cela montre que dans le protocole Tabou-LEACH il y a plusieurs paquets sont générées et livrées à la station de base.

La figure 5.8 montre la consommation d'énergie entre les deux protocoles LEACH, et Protocole Tabou-LEACH

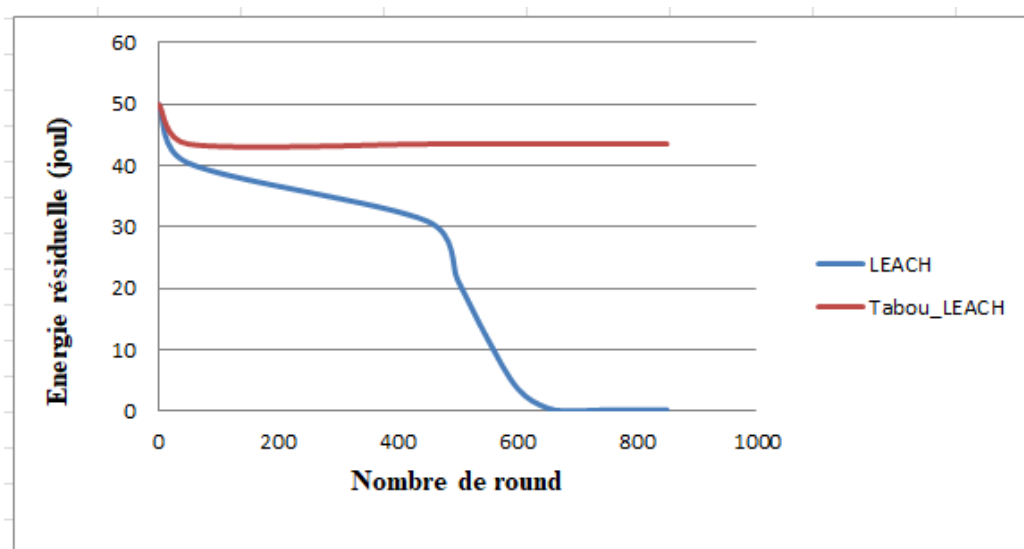


Figure 5.8: Energie résiduelle dans chaque rond.

Les résultats nous montrent que LEACH consomme plus d'énergie avec une valeur de 0.5joules après 630 round. Notre protocole Tabou-LEACH est mieux que LEACH, il consomme une énergie de 0.09 joules dans 630 rond. Alors l'énergie résiduelle dans protocole Tabou-LEACH devient plus que celle dans LEACH parce que le nombre de nœuds vivants dans protocole Tabou-LEACH est plus grand que le nombre de nœuds vivants dans LEACH,

Cette amélioration apportée par notre protocole est grâce à l'utilisation de l'algorithme de Recherche Tabou pour le choix optimal des voisinage. Cette optimisation est basée sur une fonction objective qui prend en considération la maximisation de l'énergie totale de réseau et la minimisation de la communication intra-cluster et la communication entre les CH et la station de base.

La figure 5.9montre le nombre de nœuds morts avec l'évolution du nombre des ronds dans le réseau.

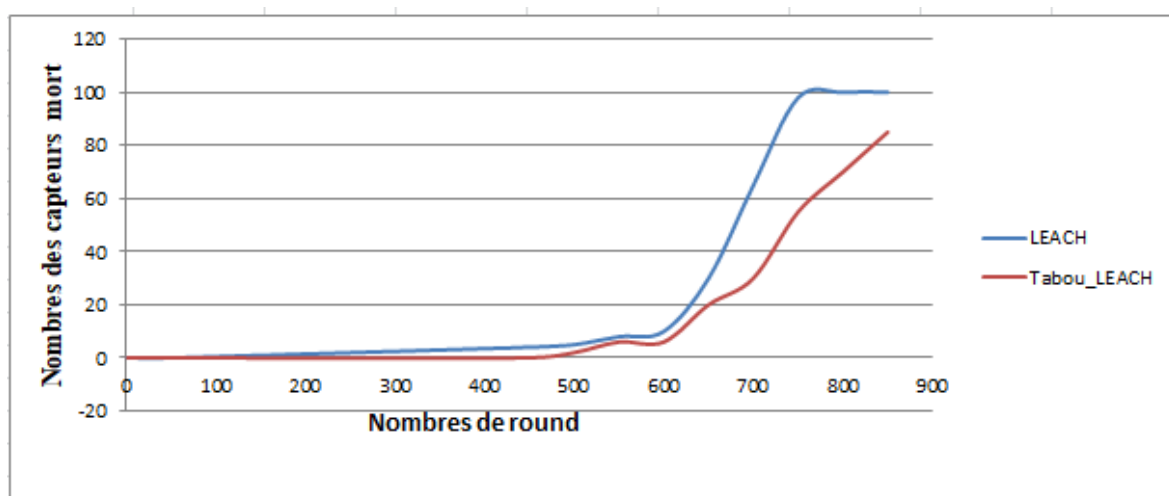


Figure 5.9:Nœuds morts dans le réseau

On remarque que le protocole Tabou-LEACH donne une grande durée de vie de réseaux par rapport à LEACH. Cette diminution dans la durée de vie dans LEACH est due à l'augmentation de la couverture, si la couverture augmente la durée de vie diminue.

La figure 5.10 représente les nombres des nœuds de capteurs vivant par rapport la durée de la vie (rond).

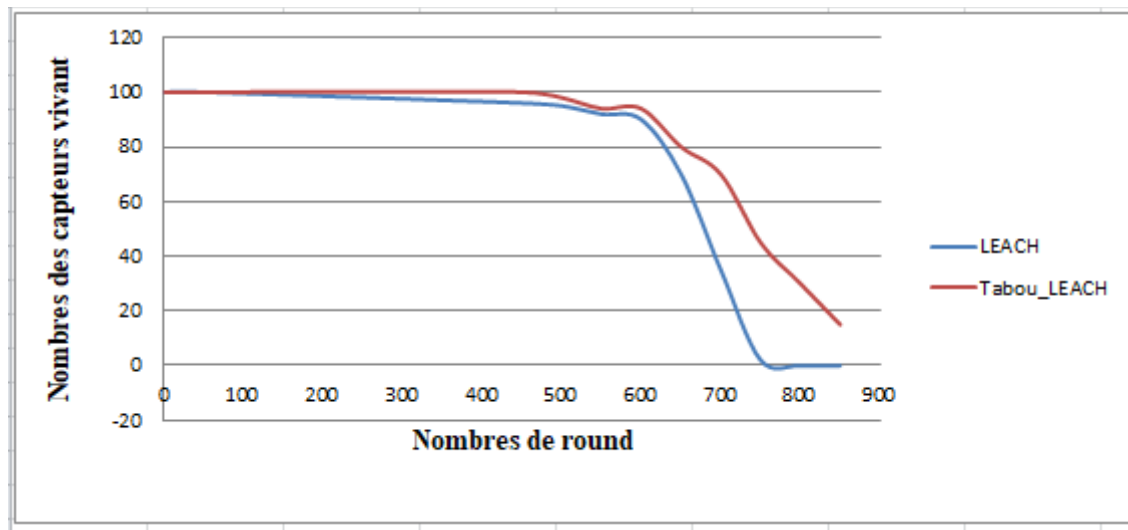


Figure 5.10: durée de vie des nœuds de capteurs

Le nombre de ronds affecte la durée de vie du réseau, puisque dans chaque rond, les nœuds envoient les données à la CH. et le CH collecte ces données et les envoie à la station de base, ce qui implique une plus grande consommation d'énergie dans LEACH et Tabou-LEACH. Cette consommation dépend de la taille du paquet et de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé et étudié les deux protocoles LEACH et Tabou-LEACH qui ont été implémentés et simulés en MATLAB pour évaluer leurs performances.

Les résultats obtenus ont montré que le protocole Tabou-LEACH apporte des améliorations considérables en termes de quantité de données délivrées à la station de base, de la durée de vie du réseau et de la consommation d'énergie en comparaison avec le protocole LEACH.

Conclusion générale

L'utilisation des batteries par les capteurs est une contrainte critique dans les réseaux de capteurs. Aussi les capteurs sont parfois déployés sans surveillance et en grand nombre, de sorte qu'il est difficile de changer ou de recharger leurs batteries. Pour cela, les algorithmes et les protocoles de communication pour les réseaux de capteurs sans fil doivent minimiser la consommation d'énergie. Mais le taux de consommation énergétique des capteurs reste très variable selon les protocoles utilisés.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés au problème de l'énergie et du routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons proposé des solutions permettant d'offrir une meilleure prise en compte des ressources énergétiques du réseau.

Nous avons implémenté et simulé le fonctionnement de protocole Tabou-LEACH et le comparé avec un autres protocole de la littérature à savoir LEACH, afin de montrer ses performance en termes de consommation énergétique et la quantité de données envoyées à la station de base. Les simulations ont montré des bons résultats, une consommation énergétique très réduite par conséquent ,une prolongation remarquable de la durée de vie des réseaux.

Comme une perspective, et pour améliorer les résultats obtenus, nous envisageons par la suite les perspectives suivantes :

- ✓ Une version multi-sauts (inter CH) de notre protocole a fin de minimisé la distance de transmission.
- ✓ Une hybridation entre l'algorithme de recherche Tabou avec d'autre méta-heuristique.
- ✓ Une version décentralisée de ce même protocole pour réduire le nombre important des paquets de contrôle.
- ✓ La simulation du protocole proposé sur un simulateur dédié aux RCSF comme NS2, OMNET++, ...etc.

Bibliographiques

- [1] B. Cărbunar, A. Grama, J. Vitek, O. Cărbunar, «Redundancy and coverage detection in sensor networks», ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), Volume 2, Issue 1, February 2006.
- [2] E. Bulut, Z. Wang et K. Szymanski, «The Effect of Neighbor Graph Connectivity on Coverage Redundancy in Wireless Sensor Networks». In Proc. Of International Conference on Communications (ICC), pp.1-5, South Africa, May 23-27, 2010.
- [3] I.F. Akyildiz, E. CAYIRCI, «Wireless Sensor Networks: A Survey». Computer networks, 38, pp.393-422, 2002.
- [4] K. Lin, J. Yu, J. Hsu, S. Zahedi, D. Lee, J. Friedman, A. Kansal, V. Raghunathan, and M. Srivastava. «Demo Abstract: Heliomote: enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting». In SenSys '05: Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 309-309, New York, NY, USA, ACM, 2005.
- [5] T.Voigt, H. Ritter, and J. Schiller, «Utilizing solar power in wireless sensor networks». Local Computer Networks, LCN '03: Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on, 2003.
- [6] M. Belloula, « La géolocalisation dans les réseaux de capteurs sans fil ; Etude de cas : Utilisation en agriculture ».Thèse de Magistère, Université Hadj Lakhder-Batna, Algérie.
- [7] K. BADER, «Détection d'intrusion dans les réseaux de capteurs sans fils», Master recherche 2 en Informatique, IFSIC-Rennes 1, 2009/2010.
- [8] K. BEYDOUN, «Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs», Grade de Docteur, L'université de FRANCHE-COMTE, 16 décembre 2009.
- [9] R. Kacimi, «Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil», Thèse de doctorat en informatique, Université de Toulouse, France, 2009.
- [10] I.F. Akyildiz, E.Cayirci, «Wireless sensor networks:a survey», IEEE Communications Magazine, Vol. 40(8), pp. 102-114, August 2002.
- [11] H. Jaleel and M. Egerstedt, «Sleep Scheduling of Wireless Sensor Networks Using Hard-core Point Processes», American Control Conference (ACC) Washington, DC, USA, June 2013.
- [12] D. Curiac, V. Constantin, P. Dan, J. Lucian and D. Alexa, «Redundancy and Its Applications in Wireless Sensor Networks: A Survey», WSEAS Transactions on Computers, Vol. 8, Issue 4, pp. 705-714, April 2009.

- [13] D. Curiac, V. Constantin, P. Dan, J. Lucian and D. Alexa, «Redundancy and Its Applications in Wireless Sensor Networks: A Survey», WSEAS Transactions on Computers, Vol. 8, Issue 4, pp. 705-714, April 2009
- [14] Y. Li and S. Gao, «Designing K-coverage schedules in wireless sensor networks», Journal of Combinatorial Optimization, 127-146, 2008.
- [15] D. Tian and N.D. Georganas, «A Coverage-Preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Network», In Proc. of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), Atlanta, Georgia, USA, September, 2002.
- [16] A. Boukerche, X. Fei and R.B. Araujo, «An optimal coverage-preserving scheme for wireless sensor networks based on local information exchange», Journal of Computer Communications (Elsevier), pp. 2708-2720, October 2007.
- [17] B. Wang, "Coverage Control in Sensor Networks", Springer Edition, ISBN 978-1-84996058-8, February 2010.
- [18] Mehmet R. Yuce, Peng ChoongNg, and Jamil Y. Khan. Monitoring of physiological parameters from multiple patients using wireless sensor network .J. Medical Systems, 32(5) :433–441, 2008.
- [19] François Ingelrest, Guillermo Barrenetxea, Gunnar Schaefer, Martin Vetterli, Olivier Couach, and Marc Parlange. Sensor scope : Application-specific sensor network for environmental monitoring. ACM Transactions On Sensor Networking, 6(2) :1–32, 2010.
- [20] M.Badet, W.Bonneau. "Mise en place d'une plate forme de test et d'expérimentation", Projet de Master Technologie de l'Internet 1ere année, Université Pau et des pays de l'Adour. 2006.
- [21] Mohamed Hamdi, Noureddine Boudriga, and Mohammad S. Obaidat. Whomoves : An optimized broadband sensor network for military vehicle tracking. Int. J. Communication Systems, 21(3) :277–300, 2008.
- [22] Vassileios Tsetos, George Alyfantis, Tilemahos Hasiotis, Odysseas Sekkas, and Stathes Hadjiefthymiades. Commercial wireless sensor networks : Technical and business issues. In 2nd International Conference on Wireless on Demand Network Systems and Service (WONS 2005), 19-21 January 2005, St. Moritz, Switzerland, pages 166–173. IEEE Computer Society, 2005.
- [23] K. BEYDOUN, «Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs», Grade de Docteur, L'université de FRANCHE-COMTE, 16 décembre 2009.
- [24] HADJ ADDA Asmaa, BENALLAL Wafaa, „Mise en place d'un schéma de routage pour la tolérance aux pannes dans les RCSF“. Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2014-2015.

- [25] Yaser Yousef, Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat Spécialité informatique, université de haute alsace, 2010.
- [26] RAMDANI MOHAMED, ,, Problèmes De Sécurité Dans Les Réseaux De Capteurs Avec Prise En Charge De L'énergie". Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Magister en Informatique, Université de SAAD DAHLAB DE BLIDA ,2012-2013.
- [27] BRAHIM Nacera, Routage multicheminsecurisé pour un réseau de capteur sans fil video, attaque wormhole: etude et contre mesure, mémoire de magister, université d'Oran, Mai 2012.
- [28] H. Zhang and J. C. Hou, Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks, Ad Hoc and Sensor Wireless Networks journal (AHSWN), 1(1-2), (2005), pp. 89-124.
- [29] Sofiane Moad « Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil » Rapport de stage Master : Recherche 2 en Informatique Université IFSIC-Rennes 1 Laboratoire de recherche : DYONISOS-IRISA Année universitaire : 2007-2008.
- [30] Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. Wireless sensor networks : A survey. Computer Networks :The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 38(4) :393–422, Mars 2002.
- [31] Yang X.S, «Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms » . Luniver Press, UK. 2008.
- [32] A.Chandrakasan W.Heinzelman and H.Balakrishnan «Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks ». International conference on parallel processing, pages 156–163, 2001.
- [33] M. Ilyas and I. Mahgoub. Handbook Of Sensor Networks «Compact Wireless And Wired Sensing Systems ». CRC press, 2005
- [34] L. Khelladi and N. Badache. «Les réseaux de capteurs : 'etat de l'art». Rapport de recherche, faculté des electronique et informatique Bab Ezzouar-Algérie, Février 2004.
- [35] S. Jain. «Energy aware communication in ad-hoc networks». Technical Report UWCSE, June 2003
- [36] G. J. Pottie and W. J. Kaiser. «Wireless integrated network sensors ». Communications of the ACM, 43(5) :51–58, May 2000..
- [37] M.Lehsaini. «Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs ».application à la domotique. PhD thesis, Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l'Ingénieur et l'université de Franche-Comté U.F.R Sciences et Techniques, 2009.
- [38] Rahim Kacimi « Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil » thèse de doctorat de l'université de TOULOUSE, Le 28 Septembre 2009.

- [39] Rahim Kacimi « Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil » thèse de doctorat de l'université de TOULOUSE, Le 28 Septembre 2009.
- [40] K.Beydoun. « Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs »Thèse de doctorat, Spécialité : Informatique, l'u.f.r des sciences et techniques de l'université de Franche-Comté,2009.
- [41] 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.
- [42] M. Erwan ERMEL, « Localisation et Routage géographique dans les réseaux sans fil hétérogènes », Université Pierre et Marie CURIE, 21 Juin 2004.
- [43] M. Ilyas and I. Mahgoub, «Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems», in CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [44] Rahim Kacimi « Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil » thèse de doctorat de l'université de TOULOUSE, Le 28 Septembre 2009.
- [45] Yasser Yousef, «Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », Thèse de Doctorat Spécialité informatique, université de haute alsace, 2010.
- [46] Abdesselam Abdelhalim, Belouatek Mohammed «Conception d'un algorithme de routage basé sur l'heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle», Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique ,Université Abou BakrBelkaid– Tlemcen, 2012- 2013
- [47] M. Abolhasan, T. Wysocki, and E. Dutkiewicz, «A review of routing protocols for mobile ad hoc networks ». Ad Hoc Networks, Elsevier, Vol. 2, Issue 1, 2004, pp. 1-22
- [48] Z. Qiang and Z. Hongbo, «An Optimized AODV Protocol in Mobile Ad Hoc Network ». In IEEE Wireless Communications and Networking and Mobile Computing, October 2008, pp. 1-4.
- [49] I. D. Chakeres and E. M. Belding-Royer, «AODV routing protocol implementation design». In IEEE Distributed Computing Systems Workshops. 23-24 March 2004, pp. 698-703
- [50] M. Macedo, A. Grilo, and M. Nunes, « Distributed Latency-Energy Minimization and interference avoidance in TDMA Wireless Sensor Networks ». ComputerNetworks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2009.
- [51] M. Nunes, A. Grilo, M. Macedo, « Interference-free TDMA slot allocation in Wireless Sensor Networks ». In: Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (IEEE LCN'2007), Dublin, Ireland, October 2007.

- [52] K.Beydoun . « Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs »Thèse de doctorat, Spécialité :Informatique, l'u.f.r des sciences et techniques de l'université de Franche-Comté,2009.
- [53] F. Glover. « Heuristic for integer programming using surrogate constraints ». Decision Sciences , 1977.
- [54] Boussaïd et I. Boussaïd, J. Lepagnot, P. Siarry « A survey on optimization metaheuristics ».Information Sciences, 237: 8–117, 2013. ISSN 0020-0255. doi :10.1016/j.ins.2013.02.041.
- [55] I. Boussaïd, A. Chatterjee, P. Siarry, & M. Ahmed-Nacer. « A comparative study of modified bbo variants and other metaheuristic optimization techniques for the optimal power allocation in wireless sensor networks ». In Amitava Chatterjee, Hadi Nobahari, & Patrick Siarry, editors, Advances in Heuristic Signal Processing and Applications , 2013.
- [56] Glover, F., Marti, R. « Metaheuristic Procedures for Training Neural Networks », vol. 36 de Operations Research/Computer Science Interfaces Series, chapitre Tabu Search, Springer US, 2006.
- [57]F. Glover, «future paths for integer programming and links to artificial intelligence»,1986.
- [58] F. Glover, «Tabu search-part I», ORSA Journal on computing, vol. 1, pp. 190-206, 1989.
- [59] A.Hertz, «Métaheuristiques » Notes de cours, Théorie, Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions GERAD. [En ligne].Disponible: <http://www.gerad.ca/~alainh/Metaheuristiques.pdf>. 14 Mai 2014.
- [60] F. Glover, «Tabu search » ORSA Journal on computing, vol. 2, pp. 4-32, 1990.
- [61] F. Glover. «Tabu Search - part i». ORSA Journal on Computing, 1(3) :190–206, 1986.
- [62] Glover, F. «Tabu Search - Part I». ORSA journal on Computing 1989, 1(3), 190–206.
- [63] Chamam, A. et PIERRE, S. « On the planning of wireless sensor networks : Energy-efficient clustering under the joint routing and coverage constraint». IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009.
- [64] Ali Norouzi1, Abdul Halim Zaim « une comparaison intégrative Energy Efficient des protocoles de routage dans le réseau de capteurs sans fil », réseau WirelessSensor, 2012.
- [65] A. Gallais, « Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs : l'exemple de la couverture de surface », Thèse doctorat en Sciences mathématiques, Juin 2007.