

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : TECHNOLOGIE  
Filière : GENIE ELECTRIQUE  
Spécialité : Réseaux et Télécommunication  
Thème

**Etude comparative de méthodes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil affectés à des applications en environnement domotique**

**Présenté Par :**

- 1) Kebir Moundir Chemseddine
- 2) Hadj-Ali Abdellah

**Devant le jury composé de :**

Mme Z.Slimane	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr K.Bendimerad	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mme S. Souiki	MAB	C.U.B.B(Ain Temouchent)	Examinateur

*Année universitaire 2018/2019*

# Remerciements

*" La crainte de l'Éternel est le commencement de la sagesse "*

*Tout d'abord, merci pour le bon « DIEU » qui nous a donné la volonté et le*

*Courage pour le parachèvement de ce travail.*

*On remercie notre encadreur Mr BENDIMERAD.pour son encadrement, son soutien, ainsi que pour ses conseils instructifs durant toute la période de ce travail. Et à tous nos Professeurs, nous tenons à leur exprimer toutes nos reconnaissances pour leurs dévouements, la confiance qu'ils nous ont accordée, leur rigueur et la qualité des commentaires et suggestions dont ils nous ont fait part.En fin, on tient aussi à remercier tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

*Nous remercions tous les ami(e)s de près et de loin qui ne nous ont pas privés de leurs soutiens, leurs bonnes humeurs quotidiennes.*

# Table des matières

Liste des figures .....	III
Liste des Tableaux.....	III
Liste des abréviations.....	IV
Introduction Générale .....	1
<b>Chapitre 1 Généralité sur réseaux capteur sans fil .....</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction.....	3
1.2 Un nœud capteur :.....	3
1.2.1 Définition d'un capteur .....	3
1.2.2 Capteur intelligent .....	3
1.2.3 Composants d'un nœud capteur .....	4
1.3 Architecture d'un RCSF .....	5
1.4 Caractéristiques et contraintes d'un RCSF: .....	6
1.5 Applications des RCSFs .....	7
1.5.1 Applications militaires.....	7
1.5.2 Applications médicales .....	7
1.5.3 Applications environnementales .....	8
1.5.4 Applications domotiques .....	9
1.5.4.a Fonctions de domotique proposes .....	10
1.5.4.b Technologie de la communication En Domotique :.....	11
1.6 Communications dans les RCSF.....	12
1.7 Conclusion .....	12
<b>Chapitre 2 Classification et choix de Protocole routage.....</b>	<b>13</b>
2.1 Introduction.....	14
2.2 Contraintes de conception des RCSF.....	14
2.2.1 Au niveau de la communication.....	14
2.2.2 Au niveau du matériel .....	14
2.3 Classification des protocoles de routage dans les RCSF .....	15
2.3.1 Protocoles plats .....	15
2.3.2 Protocoles basés sur la localisation (géographiques) .....	16

2.3.3 Protocoles hiérarchiques .....	16
2.4 Type de protocoles de routage : .....	17
2.4.1 Protocole Proactif .....	17
2.4.2 Protocole Réactif.....	17
2.4.3 Protocole Hybride .....	17
2.5 Les protocoles de routage choisi pour l'étude.....	18
2.5.1 Présentation de choix des Protocole .....	18
2.5.2 Architecture du LEACH.....	18
2.5.3 Algorithme détaillé de LEACH : .....	19
2.6 A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality (REL).....	21
2.6.1 Estimation de la qualité du lien .....	21
2.7 Conclusion .....	26
<b>Chapitre 3 Modélisation et Simulation des protocoles de routage adoptés .....</b>	<b>27</b>
3.1 Introduction.....	28
3.2 Description du système à l'étude : .....	28
3.3 Les simulateur réseaux sans fil : .....	29
3.4 Outils de réalisation : .....	30
3.5 Le Simulateur OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) .....	30
a) Le choix de simulateur : .....	30
b) Architecture .....	30
3.5.1 Castalia.....	31
a) Définition : .....	31
b) Modèle de Castalia .....	31
c) Structure d'un nœud dans Castalia.....	32
3.6 Réalisation de la simulation : .....	34
3.6.1 Objectif.....	34
3.6.2 Description du réseau des capteurs : .....	34
3.7 Implémentation des protocoles de routages .....	34
3.7.1 d'importation d'un protocole de routage dans le projet CASTALIA.....	34
<b>3.8 Exécution de la simulation et présentation des résultats .....</b>	<b>35</b>
3.8.1 Paramètres de simulation .....	35
3.8.2 Fichier Résumé : .....	36
3.9 Présentation et Implémentation : .....	37
3.9.1 La Consommation d'énergie : .....	37

3.9.2 Nombre de paquet transmet : .....	38
3.10 Conclusion .....	39
Conclusion Générale .....	41
Bibliographie.....	41

## Liste des figures

Figure 1.1: Anatomie d'un capteur intelligent Telosb de Crossbow [1] .....	4
Figure 1.2 : architecture un capteur un nœud [12] .....	5
Figure 1.3: Architecture de communication dans un RCSF [2].....	6
Figure 1.4: Réseau de capteur militaire [6].....	7
Figure 1.5: Un réseau de capteurs dans le domaine médical [7].....	8
Figure 1.6: Application environnementale.....	8
Figure 1.7: Application domotique [8] .....	9
Figure 2.1: Protocoles de routage dans les RCSF [13].....	15
Figure 2.2: Routage plat.....	16
Figure 2.3: Routage hiérarchique.....	17
Figure 2.4: Architecture du routage hiérarchique LEACH.....	18
Figure 2.5 : Estimation de la qualité des liens (bout en bout).....	22
Figure 3.1: RCSF se forme un réseau en étoile.....	28
Figure 3.2: structure (2D et 3D) de la maison avec le déploiement de capteurs.....	29
Figure 3.3:Architecture OMNeT++ [6] .....	30
Figure 3.4: Modèle Castalia [8] .....	32
Figure 3.5: Composition d'un nœud dans Castalia [21] .....	32
Figure 3.6 : Hiérarchie des dossiers dans Castalia.....	33
Figure 3.7: présentation graphique du fichier SensorNetwork.ned.....	34
Figure 3.8: code source du fichier d'initialisation omnet.ini .....	35
Figure 3.9: exemple de contenu du fichier résumé .....	36
Figure 3.10: exemple de contenu Lancement de configuration .....	37
Figure 3.11: L'énergie totale consommée dans le réseau (Graphiques/Transposition sur Excel) .....	38
Figure 3.12 : L'énergie moyenne consommée par chaque nœud (Graphiques/Transposition sur Excel)...	38
Figure 3.13 : Le nombre Total des paquets transmits à travers le réseau.....	38
Figure 3.14: Le nombre moyen de paquets transmits par chaque nœud .....	39

## Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Valeurs de paramétrisation du fichier d'initialisation omnet.ini.....	36
---	----

# Liste des abréviations

<b>ADC</b>	<i>Analog to Digital Converter</i>
<b>BAN</b>	<i>Body Area Network</i>
<b>CH</b>	<i>Cluster Head</i>
<b>CSMA</b>	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
<b>GEAR</b>	<i>Geographic and Energy Aware Routing</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineer</i>
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>
<b>LEACH</b>	<i>Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
<b>LQE</b>	<i>Link Quality Estimator</i>
<b>LQI</b>	<i>Link Quality Indicator</i>
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i>
<b>OMNet++</b>	<i>Objective Modular Network Testbed in C++</i>
<b>RCSF</b>	<i>Réseau de Capteurs Sans Fil</i>
<b>RREQ</b>	<i>Route Request Message</i>
<b>RREP</b>	<i>Route Reply</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<b>TEEN</b>	<i>Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network</i>
<b>WSN</b>	<i>Wireless Sensor Network</i>

# Introduction Générale

# Introduction Générale

---

Ces dernières années, l'essor que connaît la technologie des réseaux sans fil est largement issu des développements technologiques dans divers domaines de la micro-électronique, des télécommunications, sans oublier l'intérêt et l'apport du complexe militaro-industriel pour ces réseaux. L'émergence des Réseaux de Capteurs Sans fil (RCSF) ou WSN (en anglais : Wireless Sensor Networks) n'en est qu'une illustration flagrante, à travers les applications de recherche offertes et leurs contraintes inhérentes.

Autant de thématiques que de défis sont nés, afin de répondre aux besoins des personnes et aux requêtes de différents domaines d'application, classés en 5 grandes branches : militaire, et industriel, médical (santé), domotique et environnemental.

Les problématiques engendrées sont la source de motivation de nombreux chercheurs. Les avancées remarquables enregistrées dans le domaine des RCSF font face à de plus en plus de difficultés à résoudre. Le développement de tels réseaux pour une application donnée revient à prendre en considération trois facteurs mutuellement dépendants : l'application, le réseau et la couche physique. Le réseau constitue le facteur le plus important : il définit le protocole de communication gestionnaire des paquets de données, de la recherche des routes, de la collaboration entre les nœuds capteurs dans le routage, de la méthode d'accès au canal et des conflits générés (canal occupé,) et du choix des caractéristiques physiques du signal radio (modulation, fréquence,). Par ailleurs, L'électronique du capteur ou sa couche physique, est définie essentiellement par le module radio générant le signal, le processeur déterminant le traitement des paquets et l'application dans chaque capteur, et la partie de détection.

A partir de là, une des problématiques à traiter est de « cerner » les modalités inhérentes au développement avec des contraintes physiques et d'application en lien avec le matériel et l'environnement (fréquence, consommation d'énergie, comportement des nœuds dans le réseau, délai d'acheminement,) à travers la recherche de protocoles de communication adaptés. L'intérêt est ainsi porté sur les protocoles de communication dans les RCSF à travers deux de ses couches : couche MAC et couche routage.

Notre exemple d'application qui relève du domaine de la domotique et plus précisément la gestion automatisée et à distance de la consommation énergétique et du confort thermique ambiants, constitue un cas d'étude d'actualité très pertinent. D'autre part il s'accommode volontiers d'une modélisation orientée vers les paradigmes des protocoles de communication : couche MAC et couche routage. Ceux-ci constituent avec le paramètre qualité de service inhérent, l'objet essentiel de notre étude.

Pour la couche MAC, le choix est donné au départ : standard IEEE n802.15.4 pour d'un côté, le fait d'être le plus a plus commune dans les protocoles de communication (ZigBee, 6LoWPAN, ...), et d'un autre coté répond aux contraintes de réseau d'intérêt dans le cadre de ce projet

L'utilisation d'une batterie comme source d'énergie implique une durée limitée de la vie du réseau donc la consommation d'énergies devenue une exigence majeure dans les travaux de recherches, où plusieurs protocoles de routage ont été proposés dans le but d'optimiser la consommation énergétique et de prolonger la durée de vie du réseau. Ces contraintes ont donc donné naissance à des nouveaux protocoles de routage. Les nœuds capteurs collaborent entre eux pour la collection des informations via une communication radio basée sur la procédure multi sauts afin d'arriver jusqu'à la station de base (puis), cette dernière est administrée par un utilisateur via un réseau externe (internet, satellite).

A cette fin, notre ouvrage s'articulera sur trois grandes parties : un premier chapitre aborde les RCSF à travers leurs caractéristiques et leurs applications avec une mise en évidence de l'application domotique orientée gestion automatisée et à distance de la consommation énergétique et du confort thermique ambiants, à l'étude ici et une présentation de la pile protocolaire (modèle OSI dans ce genre de réseaux). Un deuxième chapitre traite des protocoles de routage dans les RCSF : leurs contraintes de conception puis leur classification nous amène à cerner les types de protocoles (hiérarchique : LEACH) et (plat : REL) qui peuvent satisfaire aux critères de la modélisation désirée pour ensuite être analysés par simulation. Le troisième et dernier chapitre est consacré à la caractérisation des algorithmes des protocoles LEACH et REL avec paramétrisation puis leur simulation sous environnement OMNET++ (version 4.6) Framework Castalia (version 3.2) ; il s'ensuit relevés de résultats et de graphes avec interprétation, ainsi qu'une étude comparative inter-protocoles.

Dans le dernier chapitre, nous présentons un exemple d'application des réseaux des capteurs sans fil RCSF et quelques logiciels de simulations avec la présentation des logiciels OMNET-4.6 et Castalia-3.2 fournis gratuitement (open source) avec justification de notre choix, après la comparaison des résultats obtenus de simulations, et en fin nous terminerons par une conclusion générale.

# **1. Chapitre 1**

## **Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)**

## 1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont parmi les technologies les plus importantes de nos jours. Ces réseaux sont constitués d'un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capable de récolter et de transmettre des données de manière autonome. Les nœuds capteurs composants le réseau possèdent généralement de faibles capacités de calcul, de mémoire et d'énergie. Ces contraintes matérielles ont influencé une grande partie des problématiques de recherche du domaine tel que le routage

. **Les RCSF** sont très utilisés dans plusieurs domaines allant du domaine militaire au domaine médical, en passant par l'industrie, l'écologie, la domotique, etc. Pour cela mener un travail de recherche dans ce domaine nécessite la connaissance d'un certain nombre de concepts généraux.

Dans ce chapitre, nous présentons les réseaux de capteurs sans fil avec un plan méthodologique que nous avons adopté. Nous commençons par une définition d'un capteur, son architecture et voir comment ces derniers sont déployés pour former un réseau de capteurs sans fil. Ensuite, les types des RCSF, les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil, ainsi que les différents facteurs de conception et les spécificités des RCSF seront étudiés, et nous terminons par une conclusion.

## 1.2 Un nœud capteur :

**1.2.1 Définition d'un capteur** :Un capteur est un dispositif équipé de fonctionnalités de sensation avancées. Il mesure ou détecte un événement réel, comme le mouvement, la chaleur ou la lumière et convertit la valeur mesurée dans une représentation analogique ou numérique. Il prélève des informations et élabore à partir d'une grandeur physique (information d'entrée), une autre grandeur physique de nature électrique.

**1.2.2 Capteur intelligent** : un capteur intelligent intègre de nombreux éléments électroniques additionnels, ainsi que des unités programmables et des aspects logiciels nécessaires au traitement de données, aux calculs et à la communication numérique. Il est donc caractérisé par sa capacité à effectuer une collecte de mesures, les traiter et les communiquer au monde extérieur. La figure suivante illustre un exemple de capteur intelligent



Figure 1.1: Anatomie d'un capteur intelligent Telosb de Crossbow [1]

**1.2.3 Composants d'un nœud capteur** : Un nœud capteur est composé de quatre unités de base [9] (voir la Figure 1.2) :

- **Unité d'acquisition** : est généralement composée de deux sous-unités : les capteurs et les convertisseurs analogique-numériques (ADCs). Les capteurs obtiennent des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques pour être envoyé à l'unité de traitement
- **Unité de traitement** : elle est composée de deux interfaces : une avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition, et stocke les données collectées
- **Unité de communication** : elle est responsable de la transmission et la réception des données via un support de communication sans fil et une antenne. On note que l'unité de transmission consomme beaucoup d'énergie par rapport à l'unité de traitement.
- **Unité d'énergie** : un des composants les plus importants d'un nœud sans fil est la source d'énergie. Habituellement l'alimentation par batterie est utilisée. Les batteries utilisées peuvent d'être rechargeables par l'énergie solaire ou non dans le cas où les capteurs sont déployés à l'abri du soleil comme dans les deux pôles (sud et nord). Souvent, dans les environnements hostiles il est impossible de recharger ou changer une batterie. L'unité d'énergie est responsable de

l'alimentation des différentes unités et elle réduit les dépenses, par exemple en mettant en veille les composants inactifs

Un nœud capteur peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire) [11]. On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité comme les micro-capteurs déplacés par des drones.

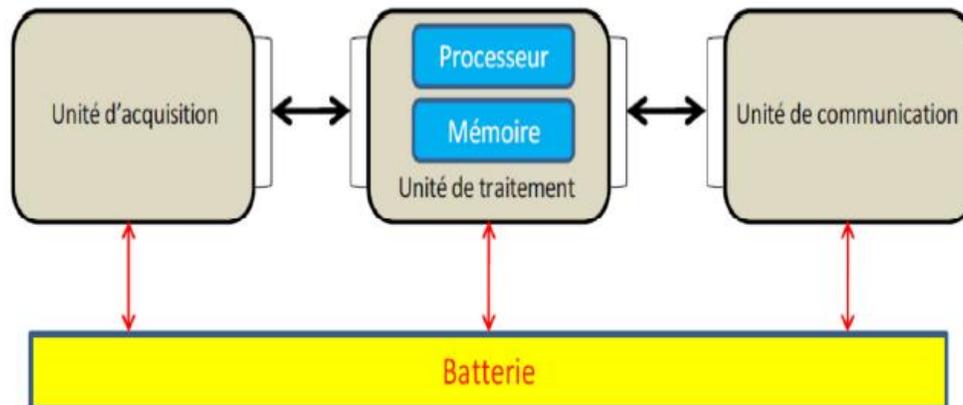


Figure 1.2 : architecture un capteur un nœud [12]

### 1.3 Architecture d'un RCSF

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans un champ de capteurs « Sensor Field ». Ils forment ainsi un réseau sans fil multi-sauts. Chaque nœud a pour mission la collecte des données et leurs routages vers le nœud de contrôle « Sink ». À son tour, le nœud de contrôle transmet les informations reçues à travers l'internet ou par satellite à l'utilisateur final.

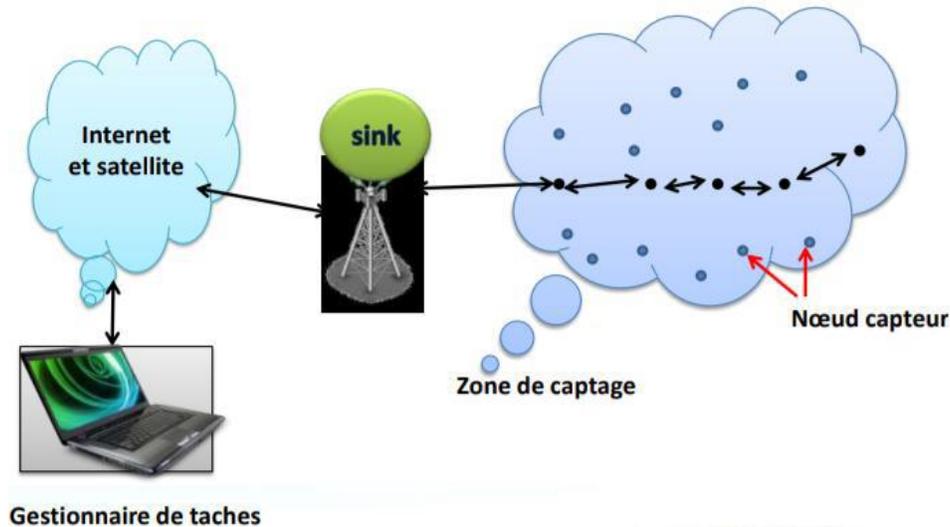


Figure 1.3: Architecture de communication dans un RCSF [2]

#### 1.4 Caractéristiques et contraintes d'un RCSF :

Les principales caractéristiques d'un réseau de capteur sans fil se résument dans ce qui suit :

- **Ressources limitées** : Les capteurs sont des objets de communication de taille très réduite ce qui limite leurs ressources en termes de : mémoire disponible, puissance de traitement, bande passante et particulièrement en quantité d'énergie embarquée [3].
- **Communication multi-saut** : Les ressources physiques limitées des nœuds capteurs leurs imposent des portées de transmission réduites, ce qui oblige les nœuds à router les informations à travers d'autres nœuds pour atteindre le nœud puits. En plus, la haute densité de déploiement des nœuds favorise l'utilisation de cette communication multi-saut qui consomme moins d'énergie que la communication traditionnelle à un seul saut [4].
- **Sécurité limitée** : Les principales caractéristiques des RCSFs rendent la sécurité très difficile à assurer. En effet, étant basés sur un déploiement dans des environnements hostiles, les réseaux de capteur sans fil sont plus sensibles aux attaques filaires. Quiconque possède un récepteur adéquat peut potentiellement écouter ou perturber les messages échangés. Notant que la puissance de calcul limitée des capteurs empêche l'utilisation des mécanismes cryptographiques résistants comme la cryptographie à clé publique [3].
- **Densité des nœuds** : Les réseaux de capteur se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un niveau de surveillance élevé et assure une transmission très fiable des données sur l'état de champ

de capteur. Vu le nombre important des nœuds le coût de production d'un capteur doit être faible pour garantir la faisabilité du réseau [5].

## 1.5 Applications des RCSFs

Le domaine d'application des RCSFs est très varié [6]. Ces réseaux sont présents dans le domaine militaire, sécurité, médical, transport, environnemental, etc.

**1.5.1 Applications militaires :** Les RCSFs permettent la détection des mouvements ennemis sur un champ de bataille ou bien de tracer leurs mouvements. De façon analogue, ils peuvent permettre la détection d'intrusion ou de cambriolage dans le domaine de la sécurité civile.



*Figure 1.4: Réseau de capteur militaire [6].*

## 1.5.2 Applications médicales

Le champ de contrôle de santé représente un grand marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui a tendance à croître très rapidement. Ces RCSF peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain telle que la surveillance le taux de **glucose** dans le sang, la détection du cancer à une étape précoce, ... grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telle que la tension artérielle, le rythme cardiaque, ... à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière.

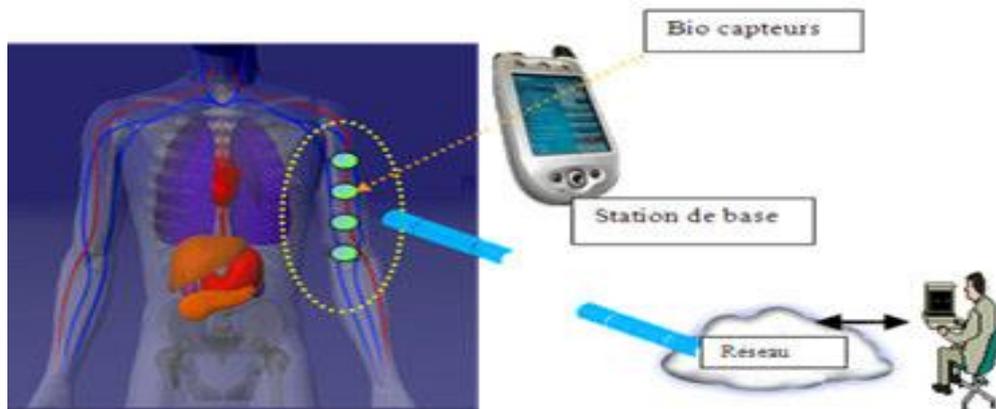


Figure 1.5: Un réseau de capteurs dans le domaine médical [7]

### 1.5.3 Applications environnementales

Les applications d'environnement qui peuvent bénéficier de la technologie des réseaux de capteurs sans fil, on peut citer par exemple, le cheminement des mouvements d'oiseaux; les macro-instruments utilisés pour la surveillance des terrains à grande échelle et les explorations planétaires; la détection chimique et biologique.



Figure 1.6: Application environnementale

**1.5.4 Applications domotiques :** Les RCSF peuvent être utilisés pour surveiller des habitations et contribuer au confort domestique, en transformant les logements en environnements intelligents dont les paramètres (température, pression, humidité, luminosité, etc..) s'adaptent automatiquement au comportement des individus.

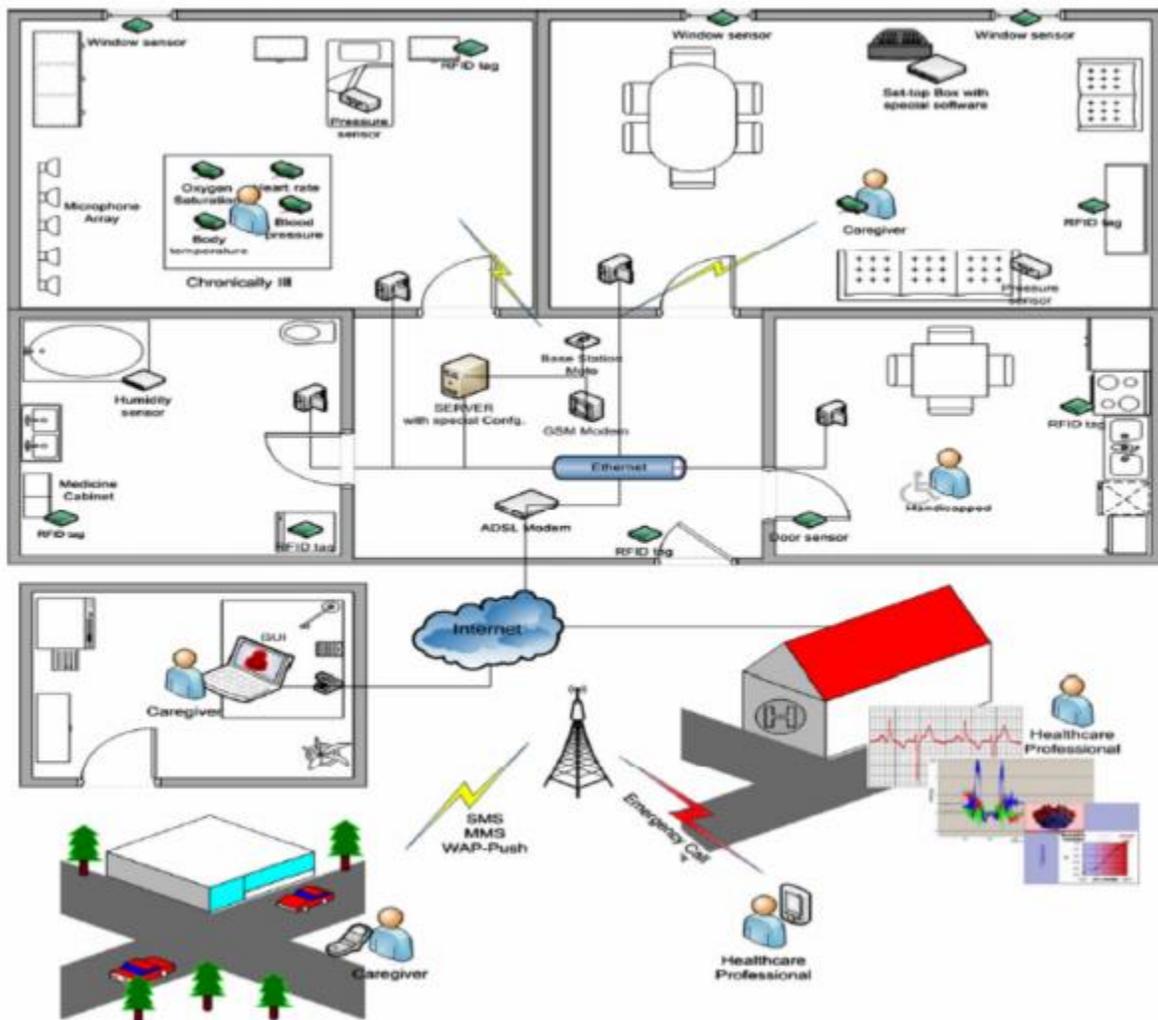


Figure 1.7: Application domotique [8]

- **Surveillance :**

En domotique, systèmes de détection sont prévus pour surveiller les enfants, prévenir les risques d'accident (incendie, fuite de gaz, etc.) et signaler des pannes (inondation, coupure de courant électrique, etc.).

La domotique de sécurité passe également par la centralisation de la surveillance et du contrôle de toutes les zones de la maison. Des capteurs de mouvements, Pour l'intérieur des pièces, des micros ultrasensibles, des caméras invisibles, des détecteurs de fumées assurent.

- **Conforte de la vie :**

Avec une installation domotique, on pourra aujourd'hui avoir une maison vivante et économe. Le fait de rendre la maison intelligente assurera un résultat basse-consommation évident. De même qu'ouvrir le portail ou la porte du garage depuis sa voiture. Plus globalement, tout ce qui se fait avec un interrupteur ou une poignée peut être automatisé et piloté à partir d'un poste fixe, ou à distance via une télécommande, un ordinateur ou un Smart phone

- **Les économies d'énergie**

La domotique permet de diminuer jusqu'à 10 % des factures d'énergie. Grâce aux automatismes et à des capteurs, les équipements électriques inter-reliés pilotent au plus juste la consommation énergétique (chauffage, éclairage, eau, ventilation, etc.), tout en gardant sous contrôle le confort des zones occupées.

Le but principal de la domotique est d'éviter le gaspillage en supprimant les dépenses inutiles. Les systèmes de régulation permettent de maîtriser la consommation d'électricité, de gérer le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, avec un niveau de confort optimal. Un détecteur de présence placé dans chaque pièce, par exemple, commande instantanément l'allumage ou l'extinction des éclairages, la mise en route ou l'arrêt du chauffage, etc.

#### 1.5.4.a Fonctions de domotique proposes

- **Fonction de gestion d'éclairage et ventilation**

Cette fonction permette aux utilisateurs de faire la gestion de l'éclairage de 3 pièces et un ventilateur dont le but d'économiser l'énergie électrique.



- **Fonction d'acquisition de la température :**

L'acquisition de la température se fait via un capteur de température pour contrôler le climat à l'intérieur de l'habitat avec de la ventilation.



- **Fonction de détection de gaz**

Cette fonction permet de détecter les fuites de gaz via un capteur de gaz. Il est apte à détecter le monoxyde de carbone, le méthane et le Gaz de Pétrole, GPL.



#### 1.5.4.b Technologie de la communication En Domotique :

- **Bluetooth / IEEE802.15.1**

Bluetooth [1] est un standard de communication sans fil qui fournit une configuration spéciale de pico-réseau maître/esclave avec le maximum de huit unités actives. Il supporte les connexions spontanées entre les périphériques sans leur exigeant des connaissances détaillées sur l'autre. Malheureusement, un grand défaut de cette technologie est sa trop grande consommation d'énergie. En plus, elle ne peut pas être utilisée pour les RCSF denses.

- **ZigBee / IEEE802.15.4**

ZigBee [2] est une norme de transmission de données sans fil permettant la communication de machine à machine. ZigBee offre des débits de données moindres, mais sa très faible consommation d'énergie et son coût de production très bas en font d'elle une candidate idéale pour la domotique et le secteur industriel.

## 1.6 Communications dans les RCSF

### 1.6.1 Pile protocolaire d'un réseau de capteurs

La pile protocolaire utilisée par les RCSF est illustrée dans la figure 1.8. Cette pile comprend cinq couches, une couche d'application, une couche de transport, une couche réseau, une couche de liaison de données et une couche physique. Ainsi que trois niveaux qui sont: le niveau de gestion d'énergie, le niveau de gestion de la mobilité et le niveau de gestion des tâches [10].

Le rôle de chacune de ces couches est résumé comme suit :

- **Couche physique** : matériels pour envoyer et recevoir les données.
- **Couche liaison de données (couche MAC)**: gestion des liaisons entre les nœuds et la station de base, contrôle d'erreurs.
- **Couche réseau** : routage et transmission de données.
- **Couche transport** : transport de données, contrôle de flux.
- **Couche application** : interface pour les applications au haut niveau.
- **Plan de gestion d'énergie** : contrôle la consommation d'énergie d'un nœud.
- **Plan de gestion de mobilité** : surveille la mobilité des nœuds de capteurs.
- **Plan de gestion de tâche** : assure la distribution des tâches pour les nœuds de capteurs.

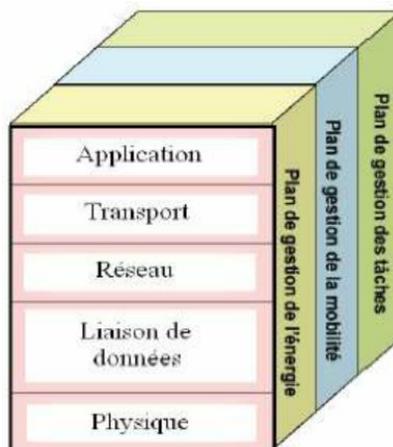


Figure 1.8: Pile protocolaire dans un réseau de capteurs sans fil [23]

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés en premier lieu quelques généralités sur les réseaux des capteurs sans fil, à savoir la description d'un réseau de capteurs sans fil, son architecture et ses types. En outre, nous avons présenté leurs principaux domaines d'applications et les défis de conception matérielle et logicielle auxquels ils sont confrontés.

## **2. Chapitre 2**

# **Classification et choix des Protocoles de routage**

## 2.1 Introduction

Une des principales fonctionnalités dans la conception de RCSF est le routage. Le problème de routage consiste à déterminer et à maintenir le chemin le plus adapté pour faire transiter les paquets de données d'une source vers une destination. L'émergence de ce type de réseau a ouvert la voie au développement de nouveaux protocoles de routages toujours plus performant les uns que les autres. Mais principalement en raison de la taille miniaturisée des nœuds capteurs, plusieurs limitations surgissent (contrainte d'énergie, capacité réduite des nœuds, etc.). Ces limitations motivent une grande partie des problématiques de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil

Objectif de ce chapitre est de décrire les notions des topologies de RCSF et les types des protocoles. On a choisi le protocole LEACH et le protocole REL.

## 2.2 Contraintes de conception des RCSF

La conception des RCSF est influencée par plusieurs contraintes. Ces facteurs importants servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs, ils sont considérés également comme métriques de comparaison de performances entre les différents travaux dans le domaine

### 2.2.1 Au niveau de la communication

- Perte de données à cause de la transmission radio** : les RCFS sont des réseaux sans fil, ce qui fait que la portée de la communication est limitée par la capacité de rayonnement des antennes utilisées, à quoi s'ajoute la limitation des renvois des paquets en raison du manque d'énergie.
- **La bande passante** : limitée et partagée par tous les nœuds du réseau de capteurs.
- Interférences** : ce réseau travaille sur une bande de fréquences non propriétaire, ce qui rend leurs communications vulnérables aux problèmes d'interférences.

### 2.2.2 Au niveau du matériel

Bien qu'ils aient de nombreux avantages, les nœuds capteurs sont caractérisés par des ressources et des composantes plus limitées en raison de leurs tailles réduites, ce qui conduit à la génération de nombreuses contraintes, parmi lesquelles on retrouve :

- Puissance de calcul limitée** : fonctionnant dans la majorité des cas avec des registres 8 ou 16 bits, les processeurs des réseaux de capteurs sont différents de ceux d'une machine classique, car ils utilisent souvent des microcontrôleurs de faible fréquence.
- Mémoire limitée** : 2 à 250 Ko de RAM et 1 à 32 Mo de mémoire flash.

-**Environnement** : Les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement (forte chaleur, pluie, humidité, etc.).

- **Consommation d'énergie** : dans ces réseaux, les nœuds sont typiquement gérés par la durée de vie de leurs batteries qui est une réserve d'énergie limitée, minimiser la consommation d'énergie est d'une importance primordiale afin de maximiser la durée de vie du RCSF.

### 2.3 Classification des protocoles de routage dans les RCSF

Selon la structure de réseau, les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil peuvent être découpés en trois familles : les algorithmes de routage plats, hiérarchiques ou géographiques. (Voir la figure 2.1).

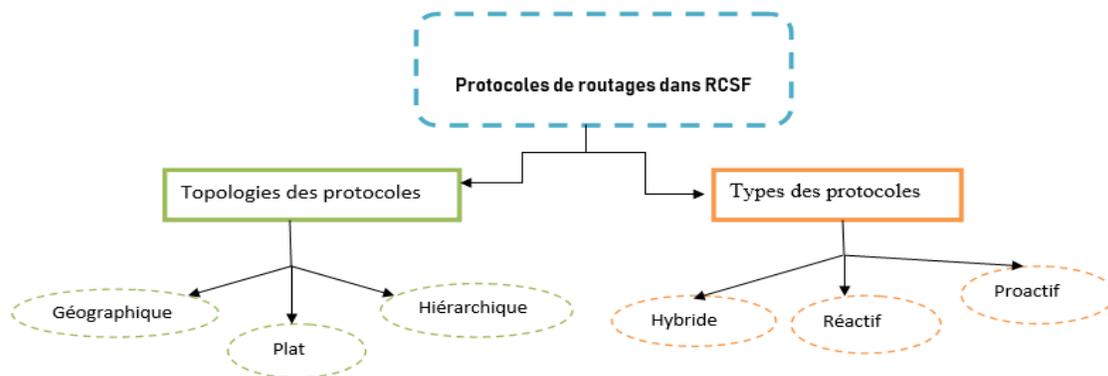


Figure 2.1: Protocoles de routage dans les RCSF [13]

#### 2.3.1 Protocoles plats

Considère que tous les nœuds sont égaux où tous les nœuds possèdent les mêmes tâches. C'est la première approche utilisée dans l'acheminement des données dans les RCSF. Elle se base sur la collaboration de tous les nœuds du réseau. Les propriétés des données sont spécifiées par un système de dénomination par attribut (attribut, valeur) en raison de la difficulté d'affecter un identificateur global à chaque nœud vu leur nombre important. Parmi leurs avantages, la simplicité d'où la possibilité d'établir des communications sans surcoût où chaque nœud n'aura besoin que des informations de ses voisins directs. L'inconvénient est l'épuisement des ressources en énergie Des nœuds proches de la station de base car tout le trafic vers cette dernière passe par eux obligatoirement. Parmi les protocoles plats : **DSDV**, **DSR**, **OLSR**.

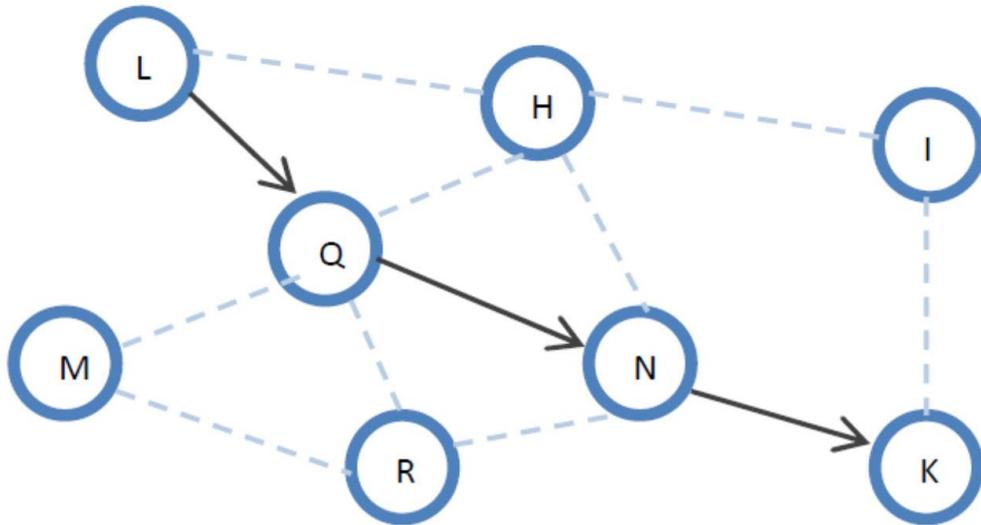


Figure 2.2: Routage plat

### 2.3.2 Protocoles basés sur la localisation (géographiques)

Les protocoles de routage géographique, appelés aussi protocoles de routage basés sur les positions. Les coordonnées relatives(position) des nœuds voisins peuvent être obtenues en échangeant une telle information entre les voisins ou par le système GPS (*Global Position System*), Le fait que les protocoles géographiques réduisent le nombre de nœuds participants à la découverte de route et réduisent ainsi consommation d'énergie et la congestion du réseau .Parmi les protocoles géographique :**GEAR, GPSR**

### 2.3.3 Protocoles hiérarchiques

Cette approche est basée sur la formation de clusters (zones communes). Le principe est de router les données récoltées par chaque nœud du cluster à son chef de zone (Cluster Head), qui et après des traitements sur leurs parties communes, les transmettra à la prochaine.

L'avantage est la réduction des coûts en communication et en énergie en minimisant le nombre de messages circulant sur le réseau, étant donné que les CHs appliquent des fonctions d'agrégat sur les données du cluster ce qui permet de les combiner. L'inconvénient concerne la taille du réseau. En outre, quand la taille du réseau augmente, le processus d'élection du Cluster Head devient critique et gourmand en ressources .Parmi les protocoles hiérarchiques : **HEED,PEGASIS, TEEN**

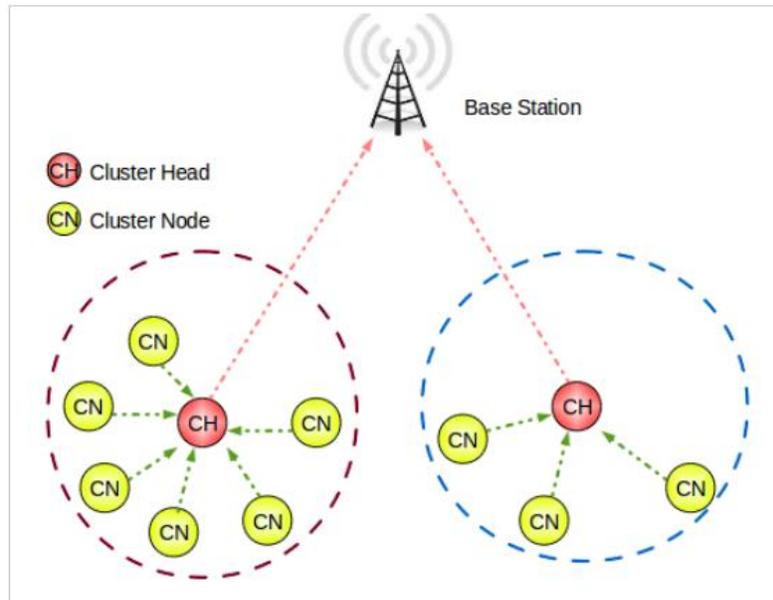


Figure 2.3: Routage hiérarchique

## 2.4 Type de protocoles de routage :

Les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : protocole proactif, protocole réactif et protocoles hybride.

**2.4.1 Protocole Proactif** : est un protocole qui construit les tables de routage avant que la demande en soit effectuée. Ces protocoles de routage essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau. Les routes sont sauvegardées même si elles ne sont pas utilisées. Les protocoles proactifs sont adaptés aux applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données. Et par conséquent, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité,

**2.4.2 Protocole Réactif** : est un protocole qui construit une table de routage lorsqu'un nœud en effectue la demande, crée et maintient des routes selon les besoins. Il ne connaît pas la topologie du réseau, il détermine le chemin à prendre pour accéder à un nœud du réseau lorsqu'on lui demande. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route est lancée. Ce type de protocoles est pratique pour des applications temps réel où les capteurs doivent réagir immédiatement à des changements soudains des valeurs captées.

**2.4.3 Protocole Hybride** : c'est un mélange de deux premiers types. Il utilise un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi, ils disposent de routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone du voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.

## 2.5 Les protocoles de routage choisis pour l'étude

### 2.5.1 Présentation de choix des Protocoles

Dans ce chapitre on va sélectionner deux protocoles de routage pour notre étude comparative à deux classes différentes, à savoir le protocole LEACH à classe clustering et protocole REL de classe Qos. Les deux protocoles plus utilisés dans maisons domotique et ville intelligent, nous expliquerons l'architecture et l'algorithme détaillé de chacun des deux protocoles. Le but de choix est pour minimiser la consommation d'énergie et une bonne qualité de service

### 2.5.2 Architecture du LEACH

La hiérarchie de regroupement d'adaptation à faible énergie (LEACH) proposé par Heinzelman [14] est un protocole de routage proactif hiérarchique bien connu appliqué dans les RSCF.

LEACH divise le réseau en zones et clusters de façon distribuée, des nœuds CH (Cluster-Head) sont constitués puis utilisés comme relais pour atteindre le puits en optimisant la consommation d'énergie suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des têtes de groupe (CH) pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds du réseau. Un nœud décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus.

Tous les nœuds non-CH transmettent leurs données à la tête du groupe. Quand le CH reçoit les données de tout les membres du groupe, il effectue des fonctions de traitement sur les données (agrégation et compression des données), et les transmet à la station de base (BS) selon une communication unicast (à un seul saut).

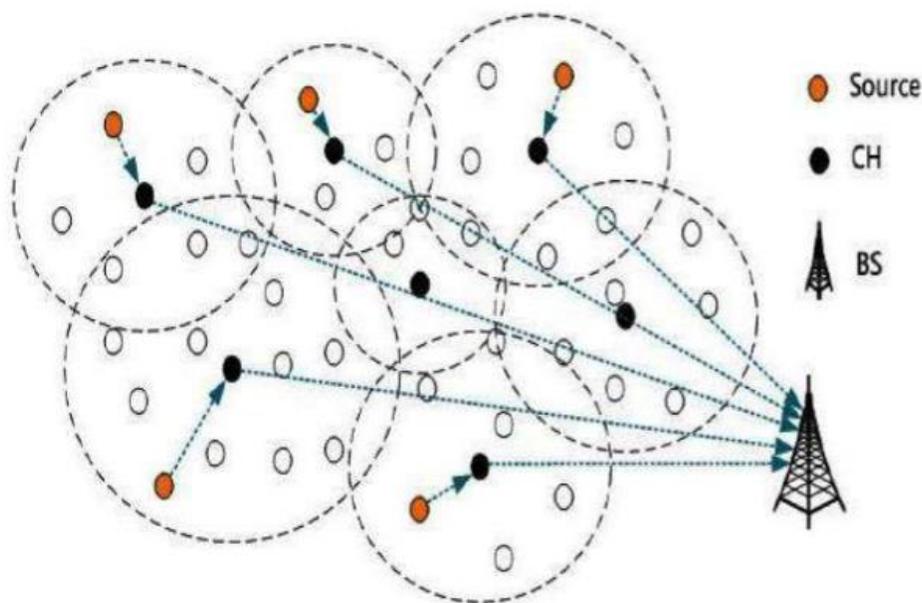


Figure 2.4: Architecture du routage hiérarchique LEACH.

### 2.5.3 Algorithme détaillé de LEACH :

L'algorithme se déroule en rounds (tours) qui ont approximativement le même intervalle de temps déterminé au préalable où chaque cycle commence par une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission.

#### 2.1 a) Phase d'initialisation :

La phase d'initialisation est composée de 3 sous phases : d'annonce, d'organisation des groupes et enfin d'ordonnancement.

- **Première étape : d'annonce**

Initialement, lorsque les groupes sont créés, chaque nœud décide ou non de devenir un CH pour le tour courant. Cette décision est basée sur le suggéré pourcentage de CHs pour le réseau et le nombre de fois que le nœud a été un CH jusqu'ici. Cette décision est faite par le nœud en choisissant un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si le nombre est inférieur à un seuil  $T(n)$  le nœud devient un CH pour le cycle actuel. Le seuil est défini comme suit :

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

1. **P** est le pourcentage souhaité de CH c'est-à-dire choisi comme  $p = 0,05$  pour une condition optimale.
2. **r** est le tour courant
3. **G** est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été CHs lors des  $(1/p)$  tours précédents.

Chaque nœud est donné une probabilité égale de  $(1/p)$  de devenir CH afin de partager la charge de l'énergie. Ainsi, lors du commencement d'un tour, chaque nœud a une probabilité égale de devenir un CH.

Les nœuds qui étaient CHs doivent attendre jusqu'à  $(1/p)$  tours, donc augmenter la probabilité contribue à augmenter la chance pour les non CH de devenir CH. Les nœuds sont de nouveau admissibles à devenir CHs si et seulement si tous les nœuds ont obtenu une fois la qualité de CH. Tout nœuds après  $((1/p) - 1)$  tours sera de nouveau élu CH en supposant que chaque nœud possède et dissipe une quantité égale d'énergie à des fins de transmission.

Chaque nœud qui se sera désigné CH pour le tour courant diffuse un message d'initialisation vers le reste des nœuds l'entourant. Lors de cette phase d'initialisation, les CHs utilisent le protocole MAC (Media Access Control) CSMA (Carrier Sense Multiple Access). En utilisant le même

---

niveau d'énergie, tous les CHs diffusent leur message d'initialisation qui contient l'ID du nœuds et un entête distinguable. Les autres nœuds doivent maintenir leurs récepteurs à l'écoute afin d'entendre les messages diffusés par les CHs, et chacun de ces nœuds décide quel groupe rejoindre pour le tour courant en se basant sur la puissance des messages reçus de la part des CHs. Plus un nœuds est proche du CH, plus le signal reçu sera puissant, indiquant à celui-ci qu'il aura besoin de moins d'énergie pour transmettre ses données vers le CH. Si deux signaux reçus ont la même puissance, alors le CH à rejoindre est choisi aléatoirement.

- **Deuxième étape : organisation des groupes**

Après que chaque nœud ait choisi quel groupe rejoindre, le CH doit être informé des nœuds composant son groupe. Chaque nœud non-CH transmet une requête de ralliement vers le CH choisi en utilisant également un protocole CSMA MAC. Ce message ou requête de ralliement se compose de l'ID du nœud, de l'ID du CH et d'un entête. Durant cette phase, tous les CHs doivent maintenir leurs récepteurs allumés.

- **Troisième étape : Ordonnancement**

Après avoir reçu les requêtes de tous les nœuds l'ayant rejoint, le CH leur alloue chacun un tour dans un ordonnancement TDMA (Time Division Multiple Access) en se basant sur le nombre de nœuds. Et ce n'est que pendant le temps qui leur est alloué que les nœuds peuvent transmettre leurs données vers le CH.

### ***b) Phase de transmission***

Une fois que les groupes se sont organisés et le programme TDMA mis en place, la transmission de données commence avec l'hypothèse que les nœuds ont toujours des données à transmettre, mais ces données ne sont envoyées à la station de base que pendant l'intervalle de temps alloué au nœud.

Ce type de transmission requiert une énergie minimale pour la transmission. Les autres nœuds membres du groupe, dont ce n'est pas le tour, doivent éteindre leurs transmetteurs afin d'éviter la dissipation inutile d'énergie. Mais le CH doit garder son récepteur allumé durant le tour courant pour recevoir toutes les données envoyées par les nœuds membres, après quoi il exécute les fonctions de traitement du signal afin de former un signal unique à transmettre. Cette agrégation de données est alors envoyée à destination de la station de base. Le coût en énergie pour le CH est toujours supérieur à celui des membres à cause des différentes actions qu'il doit entreprendre et à cause de l'énergie nécessaire pour transmettre vers la station de base qui se trouve plus loin que la distance qui le sépare des nœuds membres. Cela donne la phase d'état stable. Après que la transmission des données soit terminée, le prochain tour de sélection des CHs commence pour ce cycle là comme expliqué dans la phase d'initialisation.

## 2.6 A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality (REL)

REL est un protocole de routage réactif basé sur l'énergie et la qualité de la liaison pour les applications WSN/IOT, telles que les maisons et des bureaux confortables, les soins de santé, les contrôles environnementaux et les villes intelligentes. REL utilise la qualité de lien des liaisons sans fil et de l'énergie restant pendant le processus de sélection de route afin d'améliorer la fiabilité du système et d'assurer la QoS du support. En outre, il comprend un mécanisme événementiel pour assurer l'équilibrage de charge et éviter la congestion et la mort prématuré des nœuds / réseaux.

### 2.6.1 Estimation de la qualité du lien

Les liens dans les communications WSN sont généralement peu fiables, car ils connaissent souvent des variations de qualité et une faible connectivité. Le manque de fiabilité du lien est causé par l'utilisation de radios à faible puissance, qui se sont révélées très sensibles au bruit et à l'interférence [15]. Dans ce contexte, la stratégie efficace pour sélection d'itinéraire d'un protocole de routage dépend de la précision du LQE (Link Quality Estimator) pour augmenter la fiabilité du protocole [16]. Comme mentionné précédemment, la qualité du lien est généralement mesurée comme une seule valeur telle que RSSI ou LQI.

La procédure de découverte le chemin doit compter sur le LQE au moyen de (cross-layer informations). Dans ce scénario, les nœuds doivent pouvoir reconnaître les conditions du réseau, estimer la qualité de la liaison de bout en bout et avoir une connaissance de l'énergie restante de leur nœud voisin. Ils estiment également le nombre de sauts obligatoires pour chaque chemin possible, avant qu'ils ne puissent atteindre le nœud de destination. À la suite de cette approche, les nœuds doivent planifier et adapter dynamiquement la procédure de sélection de la route et prendre les décisions pour assurer la QoS et l'efficacité énergétique pour les applications réseau.

#### ➤ *Exemple d'estimation de la qualité des liens:*

La **Figure2.5** montre l'importance de la sélection de chemin en fonction de la cross-layer information et du rôle de Weak Links (Liens faibles) dans l'estimation de la qualité de liaison de bout en bout. Dans la **Figure2.5**, les nombres représentent les valeurs LQI, Les nœuds S et D sont respectivement les nœuds source et de destination.

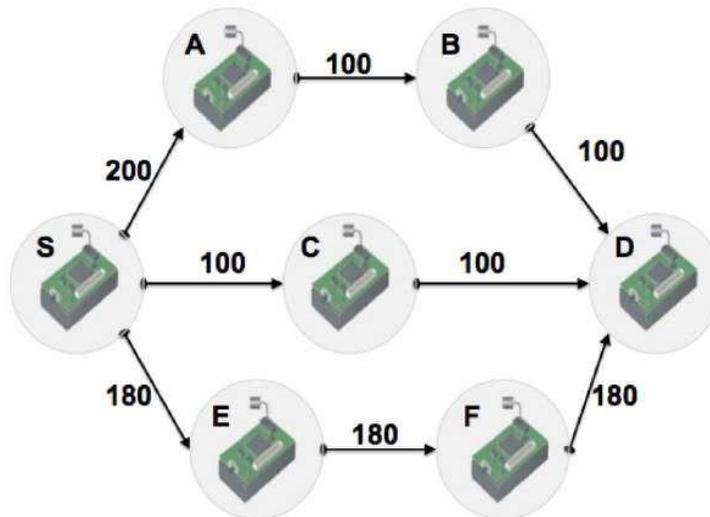


Figure 2.5 : Estimation de la qualité des liens (bout en bout)

- REL utilise le Weak Links qui est un compteur pour les pires liens sur un chemin.
- Si le LQI pour un lien donné est inférieur à LQIth (seuil LQI), le lien est considéré comme faible et le compteur Weak Links est incrémenté. Le Weak Links est incorporé dans les messages RREQ et RREP, puis une mise à jour à chaque saut pendant l'algorithme de sélection de la route.
- Lors de la réception d'un message RREQ ou RREP, un nœud met à jour sa valeur LQI.
- Après cela, il faut calculer si LQI est inférieur à LQIth et mettre à jour les Weak Links si nécessaire.
- **Selon la Figure 2.5**

Supposons  $LQI_{th} = 170$ .

1. L'algorithme de sélection de la route qui choisit le chemin avec le plus moins nombre de sauts, sélectionnera donc le nœud C comme prochain saut.

Cependant, le nœud C a une qualité de liaison inférieure, ce qui mènera aux pertes de paquets.

2. L'algorithme sélection de la route qui n'utilise que la qualité de la liaison pour le prochain saut,

Sélectionnera le nœud A comme le prochain saut.

Cependant, il existe de mauvais liens sur les chemins restant, ce qui peut également provoquer des pertes de paquets et une utilisation inégale des ressources réseau.

Enfin, lorsque la métrique Weak Links est analysée, on peut voir que :

Le nœud A a WeakLinks = 2, le nœud C a Weak Links = 2 et le nœud E a Weak Links = 0.

Ainsi, lorsque les liens sont analysés et sélectionnés dans la théorie de La qualité de la liaison de (bout en bout), le chemin le plus fiable est le nœud E. Cette route permet de fournir une plus grande fiabilité pour la livraison des données.

### 2.6.2 Sélection de chemin et équilibrage de charge

Les limitations du matériel de nœud et la variation de qualité des liens sans fil sont un grand défi pour fournir une disponibilité de service élevée [17], en particulier dans les applications WSN/IoT, où il est nécessaire de créer des mécanismes permettant d'identifier ou d'atténuer ou de résoudre le problème de la consommation d'énergie. La consommation d'énergie peut être causée par la congestion ou l'exploitation excessive d'une route conduisant à la mort prématurée de nœuds. Comme nous l'avons déjà mentionné, la solution de routage doit être utilisée des mécanismes d'équilibrage de charge capables de détourner le trafic et, par conséquent, augmenter la QoS (moins de perte de paquets et de retard) et réduire la consommation d'énergie.

L'approche principale pour l'équilibrage est l'utilisation de plusieurs chemins [18] pour contrôler /acheminer le trafic sur différentes routes. Grâce à l'utilisation de plusieurs chemins, les nœuds peuvent augmenter la fiabilité pour la transmission et le débit de données au moyen d'une agrégation de bande passante et d'une consommation d'énergie équilibrée.

REL exploite un schéma réactif pour trouver des routes demandées, dans le but de réduire les coûts de signalisation et d'améliorer l'évolutivité. La procédure de sélection de la route implique la diffusion de messages RREQ et RREP. Ces messages recherchent les chemins disponibles et assistent la procédure de sélection de la route en recueillant des informations sur l'énergie restant et la qualité des liens. Chaque RREP reçu représente une route disponible vers nœud de destination et, selon la configuration REL, il est possible de stocker n routes possibles vers un nœud de destination donné.

REL intègre / gère les valeurs de trois paramètres clés pour trouver les meilleurs chemins disponibles comme suit :

- 1) La qualité des liens sans fil basés sur la métrique de Weak Links.
- 2) L'énergie restante.
- 3) Le nombre de sauts pour éviter les longs et inefficaces chemins.

La procédure de sélection de route pour REL ça dépend sur deux seuils pour comparer les chemins possibles.

- 1) Le premier est le seuil de comptage de saut *HCdiffmaxallow* (Hop Count Maximum Difference), qui détermine quelle est la différence maximale de sauts sur un chemin donné.

- 2) Le deuxième seuil est **Eth** (Energy Threshold), qui est utilisé en deux étapes : la procédure de sélection de route et le mécanisme d'équilibrage de charge.

Dans le cas de l'optimisation de l'équilibrage de charge : l'**Eth** correspond à la surveillance des niveaux d'énergie observés dans chaque nœud individuellement. Lorsque le réseau commence son exécution (phase Bootstrap), chaque nœud doit stocker son propre pourcentage d'énergie restante après chaque unité time, le nœud doit comparer le niveau d'énergie actuel( $E(t)$ ) avec ce qui a déjà été enregistré( $E(t-1)$ )

Si la différence entre  $E(t)$  et  $E(t-1)$  est supérieure à **Eth**, elle indique un événement énergétique de décharge ou impliquant la nécessité d'une charge de la batterie.

La différence entre les niveaux d'énergie s'appelle **IndRADV** (Index RADV). L'**IndRADV** doit être comparé à **Eth**. Si la valeur dépasse le seuil, un message RADV (Route Advisor) (route conseiller) doit notifier les nœuds voisins. Le message RADV donne des informations sur la nouvelle valeur pour l'énergie restante et informe les nœuds voisins, où ils Devraient évaluer

L'utilisation de ce nœud dans leurs routes.

L'**Algorithm 1** montre la procédure de sélection de la route, où il existe trois règles de base.

- **Règle 1** : La fonction **ShiftToRoute** représente un basculement entre la route actif et la route alternative. Les trois règles filtrent les routes conformément aux conditions indiquées dans les lignes (5, 11 et 17). Ces conditions évaluent la route alternative (**Rb**) et le classer comme son niveau d'énergie, en le comparant à la route active actuelle (**Ra**).
- **Règle 2** : La ligne(17) montre l'utilisation d'**Eth** comme paramètre de tolérance (d'écart) pour la différence acceptable si **Rb** a moins d'énergie. Après avoir analysé le niveau d'énergie, l'algorithme calcule le nombre de sauts et évalue la qualité des liens. Cette évaluation se illustre dans les lignes (7, 12 et 18), où le seuil utilisé est **HCdiffmax-allow**. Selon cet algorithme, la prochaine étape d'évaluation ne doit être analysée que si **Ra** est une route qui a plus de sauts (Lignes 6 et 12).
- **Règle 3** : La règle décrite dans la ligne (17) est un cas particulier dans la procédure de sélection de la route puisqu'il analyse les cas où **Rb** a moins d'énergie que la route active. Dans ce cas, **Rb** doit remplacer **Ra** si  $(R_a.energy - R_b.energy) \leq E_{th}$  et **Rbest** considérablement plus petite (Ligne 18)

- **Algorithm 1:** Selection Route Algorithm of REL protocol.

---

```

1:  Let  $HC_{diff_{max\ allow}} = \text{Hop Count}$ 
2:  Let  $E_{th} = \text{EnergyThreshold}$ 
3:  Let  $R_a = \text{ActiveRoute}$ 
4:  Let  $R_b = \text{AlternativeRoute}$ 
5:  if  $R_a.energy = R_b.energy$  then
6:      if  $R_a.hop\ Count > R_b.hop\ Count + HC_{diff_{max\ allow}}$  then
7:          if  $R_a.weakLinks \geq R_b.weakLinks$  then
8:              Shift ToRoute( $R_b$ )
9:          end if
10:     end if
11:  else if  $R_a.energy < R_b.energy$  then
12:     if  $R_a.hop\ Count + HC_{diff_{max\ allow}} \geq R_b.hop\ Count$ 
13: then
14:     if  $R_a.weakLinks \geq R_b.weakLinks$  then
15:         Shift ToRoute( $R_b$ )
16:     end if
17:     end if
18:  else if  $R_a.energy > R_b.energy$  and  $R_a.energy \leq R_b.energy + E_{th}$  then
19:     if  $R_a.weakLinks \geq R_b.weakLinks$  and  $R_a.hopCount > R_b.hopCount + HC_{diff_{max\ allow}}$  then
20:         Shift ToRoute( $R_b$ )
21:     end if
22:  end if

```

**Figure 2.6 :** Algorithme de sélection de route du protocole REL.

Dans cet algorithme, l'utilisation du seuil d'énergie ( $E_{th}$ ) et le seuil de nombre de sauts ( $HC_{diffmax-allow}$ ) sont représentés un excellent système de réglage, Capable de configurer de la manière dont le protocole fonctionne conformément au but et aux objectifs de notre réseau application. Par exemple, imaginez un scénario avec  $HC_{diffmaxallow} = 7$ . Cela besoin aux opérations d'équilibrage de charge, car il existe un plus grand nombre de route possibles. cela provoque un retard dans le délai livraison de paquets puisque les routes (longs) avec plus de sauts utilisés.

## **2.7 Conclusion**

Ce chapitre est consacré aux protocoles de routage dans les RCSF, ces derniers sont classés de trois catégories : les protocoles plats, les protocoles de localisation et les protocoles basé sur hiérarchique, leurs présentations et le choix des protocoles REL\LEACH

Dans le chapitre qui suit nous faisons une étude comparative entre deux protocoles de routage (REL de la classe QOS et LEACH de classe Clustering)

# 3. Chapitre 3

Simulation des Protocoles de  
communication adoptés

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, afin d'évaluer les performances des deux protocoles sélectionnés pour l'étude comparative nous allons présenter en premier lieu les outils utilisés pour la réalisation de notre simulation. Ensuite les différentes étapes de l'implémentation des protocoles à l'aide d'un simulateur OMNET++ et en exploitant le Framework Castalia. Enfin il y aura des présentations détaillées des résultats obtenues avec la discussion.

### 3.2 Description du système à l'étude :

Dans le cadre de ce projet, pour l'étude d'un projet de réseau de capteurs sans fil faible de consommation d'énergie dans des environnements domotique

En domotique, sur un ordinateur ou un Smartphone, nous pouvons communiquer avec des équipements et des capteurs sans fil dans un réseau de forme étoile voire le figure 3.1

La communication est transmise par des ondes radio (wifi, Bluetooth, Zig Bee, etc.), et le message s'adresse au gestionnaire de la température qui est le thermostat: boîtier présent dans une pièce servant à mesurer la température et la réguler automatiquement ou L'utilisateur peut régler la température manuellement, Il est équipé d'un capteur de température, mais peut également contenir une présence de capteur: enregistre dans la base de données et de donner le calendrier horaire, puis il a juste besoin d'envoyer ces données aux radiateurs pour arrêter le chauffage ou la mise à jour du système

Ces mécanismes permettent des économies d'énergie. Concernant l'éclairage, quand nous rentrons dans la pièce, un détecteur de présence donne consignes aux lampes de s'allumer et s'il fait trop sombre, un détecteur de luminosité augmente leurs intensités et quand on sort les lumières s'éteignent toutes seules.

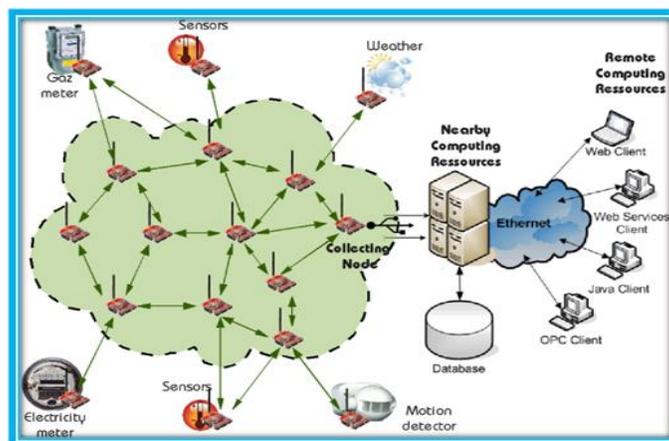


Figure 3.1: RCSF se forme un réseau en étoile



Figure 3.2: structure (2D et 3D) de la maison avec le déploiement de capteurs

### 3.3 Les simulateur réseaux sans fil :

- **NS2** : simulateur de réseaux qui peut simuler les RCSF. Il supporte plusieurs protocoles de communication au niveau de toutes les couches OSI.
- **TOSSIM** : simulateur de RCSF développé pour simuler les plateformes utilisant le système d'exploitation TinyOS. Ce simulateur est performant pour modéliser le comportement des couches d'application, mais présente de faibles performances pour simuler le comportement des protocoles MAC.
- **Omnet++** : OMNeT++ IDE (Integrated Development Environment) est basé sur la plateforme Eclipse C'est un environnement open source qui fournit des outils pour la création et la configuration des modèles de réseaux (les fichiers NED et INI) et des outils pour l'exécution d'un lot de programmes ainsi que pour l'analyse des résultats de simulation[19]

### 3.4 Outils de réalisation :

Dans cette partie, nous présentons les outils logiciels nécessaires pour le développement de notre application . Pour cela , nous avons utilisé Windows10 , le simulateur Omnetpp-4.6 et le simulateur Castalia-3.2.

### 3.5 Le Simulateur OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++)

#### a) Le choix de simulateur :

Omnet++ [6] est un environnement de simulation open source possédant une interface graphique Ergonomique intégrant un noyau de simulation. C'est un outil de simulation à Événements discrets, orienté objets, basé sur C++, gratuit pour les utilisations académiques. Il a été conçu pour simuler :

- Les systèmes réseaux de communication.
- Les systèmes multiprocesseurs.
- Les systèmes distribués.
- Actuellement, il est utilisé dans les universités pour la validation de nouveaux matériels et logiciels, ainsi que pour l'analyse et l'évaluation de protocoles de communication.
- Les réseaux de file d'attente.

OMNET++ est connu par la facilité d'apprentissage, d'intégration de nouveaux modules et la modification de ceux déjà implémentés

#### b) Architecture

L'architecture du modèle OMNeT++ se compose de plusieurs modules hiérarchiquement (Visualisé dans la figure 3.1 ci-dessous) imbriqués qui sont :

- Module système.
- Modules simples (les feuilles) : programmés en C++ encapsulant le comportement réel d'un système. Pour chaque module simple correspond un fichier .cc et un fichier .h.
- Modules composés : constitués d'un ou de plusieurs modules simples ou des Modules composés reliés entre eux. Les paramètres, les ports et les sous Modules de chaque module sont spécifiés dans un fichier ".ned".

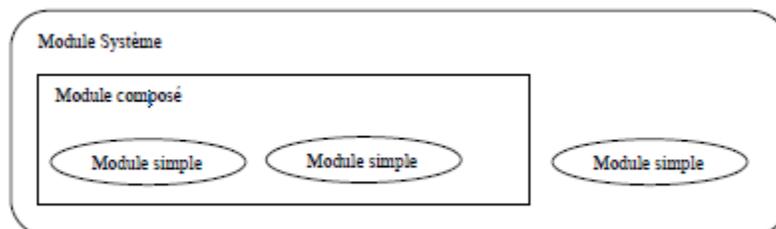


Figure 3.3:Architecture OMNeT++ [6]

### Installation du simulateur OMNeT++

L'installation d'OMNET++ se fait en différentes étapes suivant une procédure d'installation décrite dans le package télécharger selon le système d'exploitation installé [20]. Les éléments installés sur l'ordinateur seront les suivants :

- Une bibliothèque de simulation interne.
- Un compilateur du langage descriptif de la topologie NED (nedc).
- Un éditeur de réseaux graphiques pour les fichiers NED (GNED).
- Un exécutable Omnet++.
- Une Interface graphique de simulation IDE.
- Un outil de documentation de modèle (opp\_neddoc).
- Autres utilitaires (l'outil de création makefile, etc.).
- Une documentation, des simulations types, etc.

### 3.5.1 Castalia

#### a) Définition :

Castalia [8] qui est un simulateur de réseaux de capteurs (WSN), de réseaux corporels (BAN : Body Area Network) et plus généralement des réseaux de matériels embarqués de faible Puissance. Il est basé sur la plateforme OMNET++ et qui offre un modèle radio intéressant basé sur les travaux de Zuniga et al. [21]. Cela permet aux utilisateurs de se rapprocher le plus possible de la réalité avec les aléas d'un médium de communication, avec un comportement de Réaliste en particulier en matière d'accès à la radio.

Castalia peut être utilisé pour évaluer des applications spécifiques pour des différentes de Plateformes, car il est très paramétrique, et peut simuler une grande variété de plateformes

Castalia gère également la consommation d'énergie des capteurs et de processeur, l'utilisation de la mémoire et du temps CPU.

#### b) Modèle de Castalia

Castalia est une mise en œuvre d'un modèle composé appelé Sensor Network qui est lui même Composé des modules simples : Physical Process, Wireless Channel et Node (voir figure3.2)

- Physical Process : représentant les processus physiques et/ou les objets cibles à contrôler.
- Wireless Channel : représentant le canal de transmission sans fil.
- Node : représentant les nœuds capteurs et la station de base.

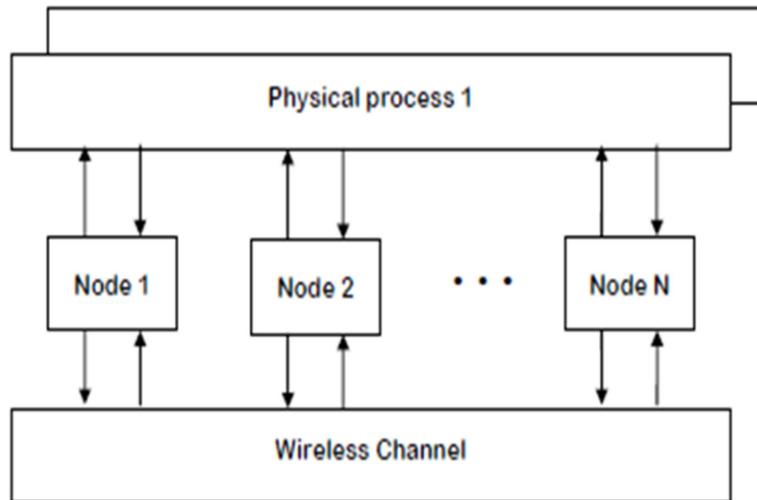


Figure 3.4: Modèle Castalia [8]

c) Structure d'un nœud dans Castalia

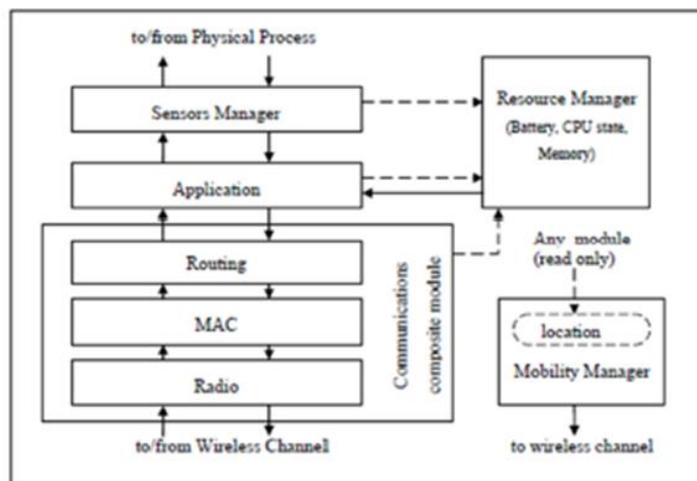


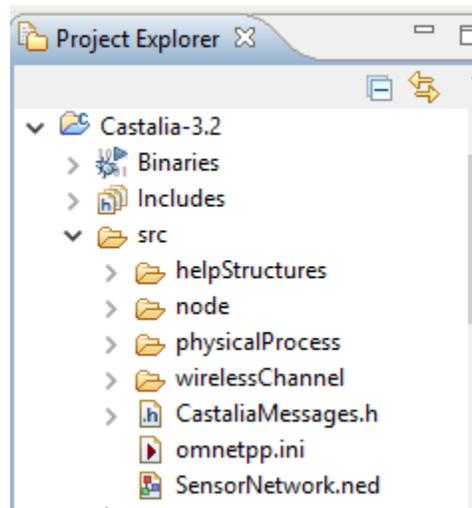
Figure 3.5: Composition d'un nœud dans Castalia [21]

- **Module radio** : supporte plusieurs états : en transmission, en réception/attente, en Veille. Il est possible de faire varier les puissances et les délais de transmission pour les différents états.

- **Module MAC (Medium Access Control)** : est une partie importante dans le comportement d'un nœud. La première motivation dans le développement de Castalia a été de tester le réglage du protocole MAC dans des conditions réalistes du canal radio.

- **Module réseau** : à partir de la version 1.2, le simulateur introduit le module réseau(routage). Au début, ils n'ont pas donné une importance à cet élément, donc il n'y avait pas de module pour le routage. L'utilisateur doit alors traiter le routage des paquets dans le module application s'il en a besoin
- **Module du gestionnaire du dispositif de perception** : module intermédiaire entre le module application et le module processus physique (mesure captée). L'application envoie les requêtes de lecture des valeurs ambiantes vers ce module, et ce dernier accède au processus physique pour lire la valeur. Ce module permet de simuler la réception de données (événements).
- **Module application** : dans lequel, l'utilisateur effectue normalement beaucoup de changements pour implémenter de nouveaux algorithmes.
- **Module mobilité** : sert à spécifier comment les nœuds se déplacent dans l'espace. Les autres modules peuvent y accéder à n'importe quel moment. Des notifications périodiques sont envoyées au canal sans fil pour donner la position des nœuds.

Toutes les définitions sont décrites et implémentées dans le répertoire *Castalia-3.2/src*. Pour mieux visualiser l'architecture de Castalia, on se réfère à la capture d'écran suivante montrant la disposition des différents éléments qui le composent.



**Figure 3.6 : Hiérarchie des dossiers dans Castalia**

La version Castalia 3.2 est basée sur le simulateur de réseaux OMNeT++ [6], version 4.0, 4.1 et 4.6. Le système d'exploitation Linux est recommandé pour l'utilisation de Castalia.

Après avoir téléchargé Castalia du site : <http://castalia.npc.nicta.com.au> faire entrer les commandes suivant :

- Extraire le dossier Castalia : `$ tar -xvzf Castalia-3.2.tar.gz.`
- Compiler Castalia : `$ cd Castalia-3.2/`  
`$ ./make`

\$make

### 3.6 Réalisation de la simulation :

#### 3.6.1 Objectif

le code source des deux protocoles au simulateur OMNET++ et exploiter les fonctionnalités du Framework « Castalia » pour obtenir des résultats présentatifs.

Les codes source des deux protocoles (LEACH et REL) sont téléchargés gratuitement à partir d'internet, le premier est développé en 2011 par un groupe de recherche de l'Université fédérale du Para, Brésil, et le deuxième est développé en 2012 par un autre groupe de recherche de la même université.

#### 3.6.2 Description du réseau des capteurs :

Le Réseau de capteurs (RCSF) est présenté dans le fichier (SensorNetwork.ned). Ce dernier possède de type de présentation: une présentation Graphique et une autre textuel (code Source)

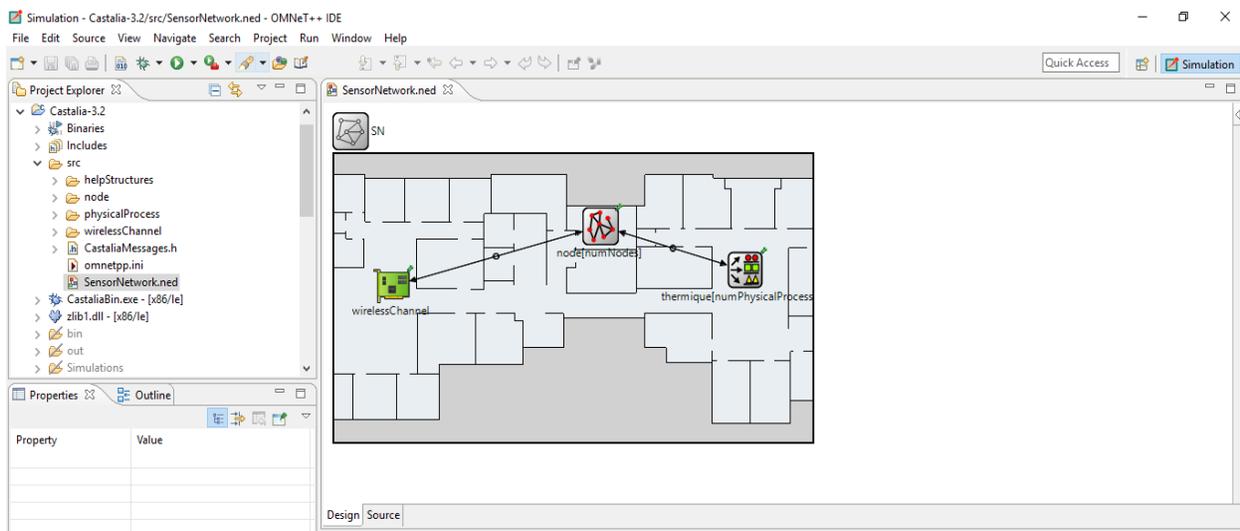


Figure 3.7: présentation graphique du fichier SensorNetwork.ned

### 3.7 Implémentation des protocoles de routages

#### 3.7.1 l'importation d'un protocole de routage dans le projet CASTALIA

1- Copiez le dossier qui contient les fichiers de base du code source de routage (\*.cc et\*.h) dans le répertoire "Castalia/src/node /communication/routing/".

- 2- Copiez le dossier qui contient le fichier d'initialisation des paramètres de simulation(\*.ini) dans le répertoire "Castalia/Simulations/".
- 3- Ouvrez l'éditeur de ligne de commande associé avec omnet++ (mingwenv.cmd) allez dans le répertoire de Castalia en suite tapez les commandes suivantes :

- ./makemake
- make

### 3.7.2 Configuration du fichier d'initialisation des paramètres (omnet.ini) :

Placement de la simulation, qui permettra d'obtenir les résultats des deux protocoles en même temps i.e. veut dire programmer un fichier (.ini) qui contient le code source de l'initialisation d'un ensemble de paramètres commun pour les deux protocoles ainsi que l'exécution simultanée de leurs simulations. C'est ainsi que nous avons réalisé notre propre fichier de code source omnet.ini.

```

# *****#
# Module: LEACH/REL Protocol for Castalia Simulator #
# *****#
] [General]
sim-time-limit = 300s
SN.numNodes = $(NbNode = 15, 25, 40)
##topology####
SN.field_x = 100 #100 metre
SN.field_y = 100 #100 metre
SN.deployment = "[0..99]->uniform"
SN.node[0..99].ResourceManager.initialEnergy = 800
include ../Parameters/Castalia.ini
### MAC ###
include ../Parameters/MAC/CSMA.ini
# wireless channel settings###
SN.wirelessChannel.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.Radio.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.MAC.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.Routing.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Application.collectTraceInfo = false
SN.node[*].SensorManager.collectTraceInfo = true
SN.node[*].ResourceManager.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "BypassMAC"
SN.wirelessChannel.collectTraceInfo = false
SN.node[*].MobilityManager.collectTraceInfo = false
SN.wirelessChannel.onlyStaticNodes = true
SN.wirelessChannel.sigma = 0
SN.wirelessChannel.bidirectionalSigma = 0
SN.wirelessChannel.pathLossExponent = 2.0 # Free Space
# *****#
# radio model cc2420 #
# *****#
SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
SN.node[*].Communication.Routing.netBufferSize = 1000
SN.node[0].Communication.Routing.isSink = true
SN.node[*].Communication.Routing.plotLength = 0.2

```

```

44 [Config LEACH]
45 SN.node[*].Communication.RoutingProtocolName = "LeachRouting"
46 # *****#
47 # Configuration REL #
48 # *****#
49 [Config REL]
50 SN.node[*].Communication.RoutingProtocolName = "RELRouting"
51 # *****#

```

Figure 3.8: code source du fichier d'initialisation omnet.ini

## 3.8 Exécution de la simulation et présentation des résultats

### 3.8.1 Paramètres de simulation

Paramètre simulateur	Valeur
Topologie du RCSF	Etoile
Champ de noeudsdéployés	100*100 (m*m)
Nombre de noeudsdéployés	Variable 15 / 25 / 40
EnergieInitiale	800 Joules
Node Mobilité	fixe
Durée de Simulation	300 secondes
Technologie Radio utilisée	CC2420
Protocole MAC utilisé	CSMA
Couche Application	ThroughputTest
Protocoles de routageutilisés	LeachRouting / RelRouting

Tableau3.1 : code source du fichier d'initialisation omnet.ini

### 3.8.2 Fichier Résumé :

Dans ce dernier ils sont enregistrés les valeurs résultat de la simulation (le nombre de paquets transmis, reçus et perdus, la consommation d'énergie...etc.)

```

[Castalia] what:[LEACH,REL] (1)
Castalia| when:2019-03-05 11:41
Castalia| label:LEACH,NbNode=16
Castalia|   module:SN.node[0].Communication.Radio
Castalia|     simple output name:RX pkt breakdown
Castalia|       2 Failed with NO interference
Castalia|       253 Received with NO interference
Castalia|   module:SN.node[0].Application
Castalia|     index:1 simple output name:Pkets received per node
Castalia|       14
Castalia|     index:2 simple output name:Pkets received per node
Castalia|       7
Castalia|     index:3 simple output name:Pkets received per node
Castalia|       12
Castalia|     index:4 simple output name:Pkets received per node
Castalia|       6
Castalia|     index:5 simple output name:Pkets received per node
Castalia|       12
Castalia|     index:6 simple output name:Pkets received per node
Castalia|       17
Castalia|     index:7 simple output name:Pkets received per node
Castalia|       6
Castalia|     index:8 simple output name:Pkets received per node
Castalia|       7
Castalia|     index:9 simple output name:Pkets received per node

```

Figure 3.9: exemple de contenu du fichier résumé

```

/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE
Welcome to OMNeT++ 4.6!
/c/Omnet/omnetpp-4.6$ cd ../Castalia/Simulations/PFE/
/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE$ ../../bin/Castalia
List of available input files and configurations:
* omnetpp.ini
  General
  LEACH
  REL
  AODV
/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE$ ../../bin/Castalia -c [LEACH,REL] -o PFE.
Running configuration 1/2
Running configuration 2/2
    
```

Figure 3.10: exemple de contenu Lancement de configuration

### 3.9 Présentation et Implémentation :

#### 3.9.1 La Consommation d'énergie :

```

/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE
/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE$ ../../bin/CastaliaResults -i PFE3.txt -s Energy
ResourceManager:Consumed Energy
+-----+-----+-----+
|         | NbNode=15 | NbNode=25 | NbNode=40 |
+-----+-----+-----+
| LEACH   | 5.603     | 8.244     | 10.26     |
| REL     | 7.322     | 12.552    | 20.397    |
+-----+-----+-----+
/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE$
    
```

```

/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE
/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE$ ../../bin/CastaliaResults -i PFE3.txt -s Energy --sum
ResourceManager:Consumed Energy
+-----+-----+-----+
|         | NbNode=15 | NbNode=25 | NbNode=40 |
+-----+-----+-----+
| LEACH   | 218.499   | 321.513   | 400.157   |
| REL     | 285.572   | 489.528   | 795.485   |
+-----+-----+-----+
/c/Omnet/Castalia/Simulations/PFE$
    
```

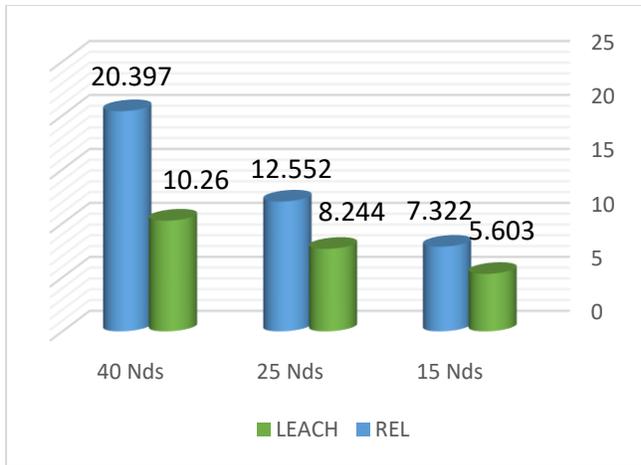


Figure 3.12 : L'énergie moyenne consommée par chaque nœud (Graphiques/Transposition sur Excel)

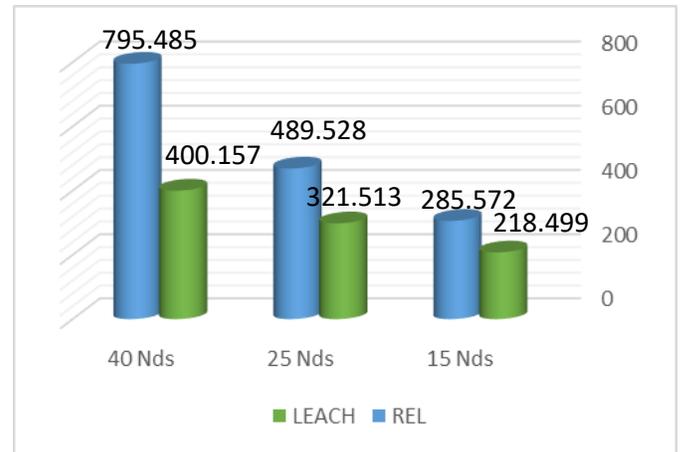
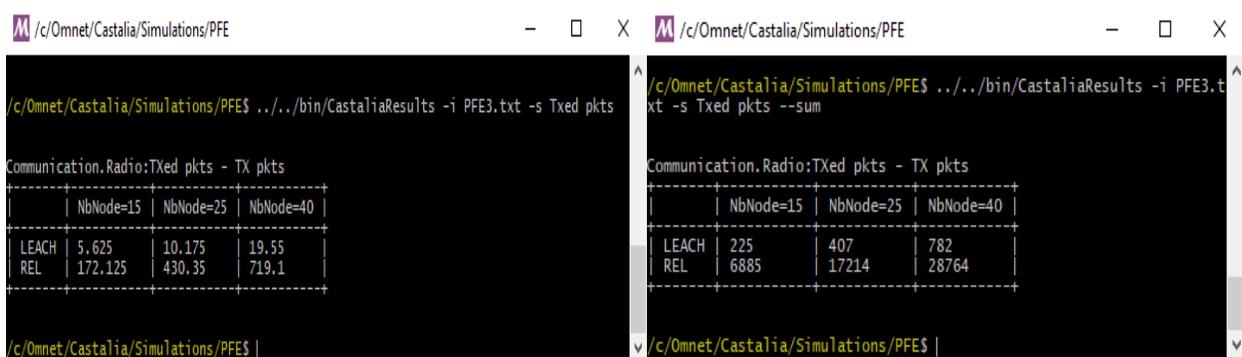


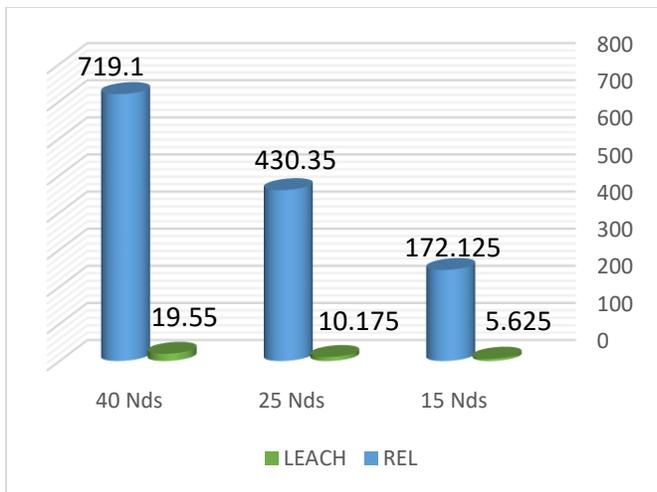
Figure 3.11: L'énergie totale consommée dans le réseau (Graphiques/Transposition sur Excel)

Nous montrons l'énergie moyenne consommée par un nœud dans le réseau avec les deux protocoles de routage indiqués. On observe que l'énergie consommée par le nœud de protocole REL est supérieure à celle du consommée par le nœud de protocole LEACH, à cause de nombre des processus et des calculs supplémentaires. Le nœud de protocole REL doit spécifier comment envoyer un paquet chaque fois pour assurer la qualité de service. Par conséquent, un traitement supplémentaire entraîne une consommation d'énergie plus élevée. Contrairement aux groupes de réseaux LEACH ou chaque nœud de paquet est envoyé directement au CH correspondant pendant une période donnée.

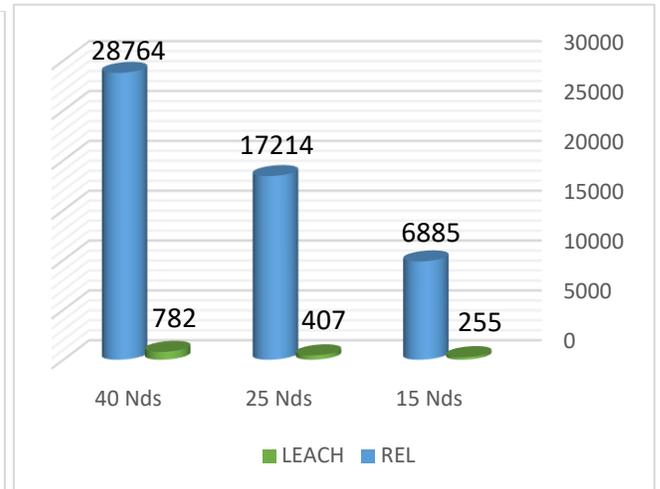
À travers les résultats on peut observer la différence entre les deux protocoles (REL, LEACH) (voir **figure 3.11**), l'augmentation du nombre de nœud implique augmentation du nombre de traitement de calcul de route implique plus d'énergie consommée.

### 3.9.2 Nombre de paquet transmet :





**Figure 3.14:** Le nombre moyen de paquets transmits par chaque nœud (Graphiques/Transposition sur Excel)



**Figure 3.13 :** Le nombre Total des paquets transmits à travers le réseau (Graphiques/Transposition sur Excel)

Nous observons le nombre moyen des paquets transmis par chaque nœud dans les réseaux avec deux protocoles (LEACH, REL), le nombre moyen transmet par chaque nœud avec le protocole REL est plus importante par rapport à celui transmet par un nœud de protocole LEACH, ceci pourra être justifié par le nombre des paquets envoyés et réceptionnés dans un réseau REL par chaque nœud dans les opérations de calcul et de sélection des routes d'envoi.

L'augmentation du nombre des nœuds dans la simulation augmente du nombre de paquets transmits dans le réseau, tandis que le nombre de paquets transmet dans réseaux REL plus important par rapport dans réseaux LEACH.

### 3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats obtenus montrent la performance de protocole LEACH par rapport au protocole REL en matière de consommation d'énergie et le nombre de paquet transmits.

On conclut que le protocole LEACH est faveur en consommation d'énergie et le protocole REL est faveur en qualité de service.

# Conclusion générale

## Conclusion Générale

---

Le travail consigné dans ce mémoire a été le fruit d'une étude menée dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil. Ce qui permis découvrit les propriétés de ces derniers, de leurs contraintes et des domaines variés qui Utilisent.

Dans ce cadre de notre d'étude comparative, on s'est intéressé à certaines critères relatifs à la performance des capteurs sans fil. Et particulièrement la consommation énergétique en environnement domotique, ce qui a motivé les chercheurs à se focaliser plus sur cette problématique pour pouvoir allonger la durée de vie.

De ce fait, deux protocoles de routage destinés aux réseaux domotique et appartenant à deux classes différentes ont été sélectionnés pour être comparé l'un avec l'autre, et cela en utilisant des outils de simulation convenables. Nous avons effectué une comparaison entre deux protocoles de routage (REL, LEACH) en termes de prolongement de durée de vie du réseau ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique, nous avons simulé le fonctionnement de ces Protocoles avec le simulateur OMNeT++ en exploitant les fonctionnalités de la plateforme "Castalia".

Nous concluons que, d'après les résultats obtenus, le protocole LEACH en faveur que le protocole REL en termes de consommation d'énergie et une durée de vie. LEACH offre également une durée de vie prolongée du réseau en raison de la capacité d'économie d'énergie

Enfin, comme perspectives nous suggérons d'entreprendre d'autres comparaisons entre d'autres protocoles de routage amélioré appartenant à la même catégorie ou en différentes catégories pouvant être importées, afin de mieux comprendre le fonctionnement de plusieurs protocoles de routage pour réduire la consommation d'énergie et allonger la durée de vie et qu'assuré la qualité de service de réseaux environnement domotique.

## Bibliographie

---

- [1] Telosb Sensor Network: <https://telosbsensors.wordpress.com> Modified on January 2014.
- [2] Yousef BENABASSI « Application de la redondance pour la surveillance par RCSF : cas du reseau de capteurs image sans fil » université“oranfacultédesSciences Exactes et Appliquées.
- [3] C.Castelluccia et E.Francillon. «Protéger les réseaux de capteurs sans fil». Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), 2008.
- [4]. L.Khelladi, N.Badache, «Les réseaux de capteurs : Etas de l’art». Rapport de recherche, USTHB, Alger, 2004.
- [5] F. Akyildiz, Weilian Su, Sankarasubramaniam, E. Cayirci. «A survey on sensor networks». IEEE Communications, 2002
- [6] M.Belbachir. «Stratégie de tolérance aux pannes pour un routage efficace dans les réseaux de capteurs». Mémoire Magister, Université Abou BakrBelkaid-Tlemcen, 2014 .
- [7] M.Hadjila, “Protocoles de routage économes en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil”, Thèse de Doctorat en Informatique, Université de Tlemcen, Algérie, Décembre 2009.
- [8] H. Alemdar and C. Ersoy, “Wireless Sensor Networks for Healthcare: A Survey”, Computer Networks, vol. 54, no. 15, pp.2688-2710, October 2010.
- [9].I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. “Wireless sensor networks: a survey”, Computer Networks (Elsevier), vol.38, no.4, pp.393-422, March 2002.
- [10]A.Nasipuri , R.Castaneda, S.R.Das. «Performance of multi-path routing for On-demand protocols in mobile ad hoc networks». IEEE Personal Communications, 2001.
- [11] K. Lin, J. Yu, J. Hsu, S. Zahedi, D. Lee, J. Friedman, A. Kansal, V. Raghunathan, and M. Srivastava, Heliomote “: Enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting,” in Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys’05), pp.309–309, 2005.
- [12] M. LEHSAINI, “Diffusion et Couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs sans fil”, Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Université de Franche-Comté, 2009.
- [13] K. Akkaya, M. Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor networks”, Ad Hoc Networks, vol. 3, no. 3, pp.325-349, May 2005.
- [14] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, Energy-Ecient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, International Conference on Systems Science, vol. 8, pp. 8020, January 2000.
- [15]A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 7th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN), Coimbra, Portugal, 17–19 February 2010; pp.240–255

[16]. Baccour, N.; Koub<sup>aa</sup>, A.; Youssef, H.; Jam<sup>aa</sup>, M.B.; Ros<sup>´</sup>ario, D.; Becker, L.B.; Alves, M. F-LQE: A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 7th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN), Coimbra, Portugal, 17– 19 February 2010; pp.240–255.

[17]Srinivasan, K.; Dutta, P.; Tavakoli, A.; Levis, P. An empirical study of low-power wireless. ACM Trans. Sens. Netw. 2010, 6, 1–48.

18-Radi, M.; Dezfouli, B.; Bakar, K.; Lee, M. Multipath routing in wireless sensor networks: Survey and research challenges. Sensors 2012, 12, 650–685.

[19]C.Mallanda, A. Suri, V. Kunchakarra, S.S. Iyengar\*,R. Kan- nan\* and A. Durresi"Simulating Wireless Sensor Networks with OMNeT++", S. Sastry The University of Akron, Akron, Ohio.

[20]OMNeT++ Installation Guide Version 4.6 ",2014 P,Q

[21]M. Zuniga and B. Krishnamachari, “Analyzing the transitional region in low power wireless links”, In the Proceedings of the 1<sup>st</sup> Annual IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, *pp.517-526*, 2004

[22] Mr. Kassie Machado “A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality for Internet of Things Applications” , Article University of Para brazil , 4 February 2013

## Résumé

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) constituent une technologie émergente, dotée de potentialités puissantes et créatives. Dans le domaine du bâtiment en général et de la domotique en particulier. Le RCSF est une collection d'un grand nombre de petits nœuds qui agissent en tant que routeurs également. Ces nœuds sont porteurs d'une source d'énergie très limitée ce qui rend la consommation d'énergie un facteur très contraignant. De ce fait la minimisation de ce facteur devient incontournable dans la prolongation de la durée de vie du réseau. Pendant que les nœuds de capteurs agissent comme des routeurs, la détermination des protocoles de routage joue une fonction clé dans la gestion et le contrôle de la consommation d'énergie. Notre travail s'attèle à apporter une contribution dans le domaine de la modélisation par algorithme et l'analyse par simulation de protocoles de routage. Plus précisément, notre étude est de faire comparaison entre deux protocoles qui traitent deux contraintes déférents, **LEACH** basé sur la consommation énergétique et **REL** basé sur la qualité de service. Pour faire, nous nous bornons à exploiter un code algorithmique déjà existant, implémenté sous **OMNET++** sous plateforme de **Castalia**, dans laquelle les performances de nos protocoles sont comparées.

**Mots clés :** RCSF, Consommation d'énergie, Durée de vie du réseau, LEACH, REL

## Abstract

Wireless Sensor Networks (RCSF) is an emerging technology, with powerful and creative potential. In the field of building in general and home automation in particular. The RCSF is a collection of a large number of small nodes that act as routers as well. These nodes carry a very limited energy source which makes energy consumption a very constraining factor. As a result, the minimization of this factor becomes unavoidable in the extension of the lifetime of the network. While sensor nodes act as routers, the determination of routing protocols plays a key role in the management and control of power consumption. Our work focuses on making a contribution in the field of algorithmic modeling and simulation analysis of routing protocols. More specifically, our study is to compare two protocols that deal with two different constraints, **LEACH** based on energy consumption and **REL** based on quality of service. To do so, we only use an existing algorithmic code, implemented under **OMNET ++** under **Castalia** platform, in which the performances of our protocols are compared.

**Keywords:** WSN, Energy Consumption, Network Lifetime, LEACH, REL