



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mohamed Khider – BISKRA

Faculté des Sciences Exactes, des Sciences de la Nature et de la Vie

## Département d'informatique

N° d'ordre : RTIC 26/M2/2021

### Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de master académique en

## Informatique

Parcours : Réseaux et Technologies de l'Information et de la Communication (RTIC)

---

# Un protocole de routage orienté QoS pour une transmission opportune et fiable dans des applications de réseau sans fil en temps-réel --Etude de cas domaine d'irrigation--

---

Par :

**BENSAID OMAR**

Soutenu le 28/06/2022 devant le jury composé de :

Sahraoui Somia	MCA	Président
Ben Aissa Yousra	MAB	Encadrant
Meklid Abdessalam	MAA	Examineur

Année universitaire 2021-2022

## *Remerciements*

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir donné la force, la patience, le courage et la volonté pendant mes études pour arriver à ce point et atteindre mes objectifs pour terminer ce travail.

Mes profonds remerciements et ma gratitude vont à :

**Dr. Yusra BENAISSA.**

Pour diriger ce travail dans la bonne direction et pour ses conseils précis et précieux.

Je remercie les membres du jury, chacun à son nom, pour avoir accepté de juger ce travail modeste.

*Premièrement, je dédie mon travail à Allah, mon Créateur.  
Mon grand professeur et messenger Mohammad (que Dieu  
le bénisse et lui accorde la paix) qui nous a enseigné le but  
de la vie.*

*Je dédie ma lettre à toute ma famille et un sentiment  
particulier de gratitude à mes **chers parents** dont ces  
paroles m'ont toujours encouragé et poussé en avant.*

*Je dédie également ce travail à **ma femme** et à ma  
partenaire de vie.*

*À mon fils : **Amir Abdel Kadir** et mes filles : **Abir,  
Hana, Ritadj et Inas.***

*Je dédie également ce message à tous les membres de la  
famille **BENSAIID.***

*Je ne peux pas non plus ne pas remercier tous mes amis et  
collègues qui m'ont soutenu tout au long de ce voyage.*

*J'apprécierai toujours tout ce qu'ils ont fait et donné.*

*Que Dieu le tout-Puissant leur accorde une santé et un  
bien-être continus. AMEEN*

**BENSAID Omar**

## *Résumé*

L'irrigation est un domaine stratégique dans le domaine de l'agriculture qui nécessite plus de préoccupations et d'efforts pour l'améliorer et résoudre son principal problème qui est le gaspillage de l'eau qui est devenue une ressource critique qui a été réduite jour après jour. Dans cette thèse, nous avons proposé un système d'irrigation intelligent(SII) basé sur RCSF en utilisant une nouvelle extension d'un protocole de routage connu appelé LEACH. Afin que ce protocole réponde à nos critères définis qui sont le temps réel et la consommation d'énergie avant qu'un nœud n'envoie les données.

**Mots Clés :** RCSF, LEACH, système d'irrigation intelligent (SII), Temps réel, Consommation d'énergie.

## *Abstract*

Irrigation is a strategic area in the field of agriculture which needs more concern and efforts to improve it and solve its main problem which is the waste of water which has become a critical resource that has been reduced day by day. In this thesis, we proposed an intelligent irrigation system(IIS) based on wireless sensor network using a new extension of a known routing protocol called LEACH. In order for this protocol to meet our defined criteria of real time and energy consumption before a node sends the data.

**Keywords:** wireless sensor network (WSN), LEACH, Smart irrigation sysytem (IIS), Real time, Power Consumption.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Résumé</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des Algorithmes</b>	<b>x</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Noeud Capteur . . . . .	5
1.2.1 Définition . . . . .	5
1.2.2 Anatomie d'un noeud capteur . . . . .	5
1.3 Définition de RCSF . . . . .	6
1.4 Caractéristiques des RCSF . . . . .	6
1.5 Architecture des réseaux de capteur sans fils . . . . .	8
1.5.1 Architecture de communication d'un RCSF . . . . .	8
1.5.2 Architecture logicielle(Pile Protocolaire) . . . . .	9
1.6 Types de RCSF . . . . .	10
1.7 Domaines d'application des RCSF . . . . .	12
1.7.1 Agriculture . . . . .	12
1.7.2 Transports . . . . .	13
1.7.3 Militaires . . . . .	13
1.8 Problèmes des RCSF . . . . .	13

1.8.1	Les défis du routage dans les RCSF . . . . .	13
1.8.2	Problèmes de design . . . . .	14
1.8.3	Coût de production . . . . .	14
	Sécurité . . . . .	15
	Déploiement des Adhoc . . . . .	15
	Qualité de service (Qos) . . . . .	15
	Délai . . . . .	16
	Robustesse . . . . .	16
1.8.4	Problèmes de topologie . . . . .	16
1.9	Différence entre RCSF et Ad hoc . . . . .	17
1.10	Conclusion . . . . .	18
<b>2</b>	<b>L'utilisation des RCSF dans le domaine d'irrigation</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction . . . . .	19
2.2	Problèmes d'irrigation . . . . .	20
2.3	L'utilisation de RCSF dans l'irrigation . . . . .	21
	2.3.1 Nécessité de l'irrigation automatique . . . . .	21
2.4	Les Types des systèmes d'irrigation . . . . .	21
	2.4.1 Irrigation goutte à goutte . . . . .	22
	2.4.2 L'irrigation par aspersion . . . . .	22
	2.4.3 Irrigation à pivot central . . . . .	23
	2.4.4 Irrigation par sillons . . . . .	23
	2.4.5 Irrigation en terrasse . . . . .	24
2.5	Consommation d'énergie dans les RCSF . . . . .	25
	2.5.1 l'énergie de détection . . . . .	26
	2.5.2 Energie de Calcul . . . . .	26
	2.5.3 Energie de communication . . . . .	27
2.6	Gestion d'énergie dans RCSF . . . . .	27
2.7	Protocoles de routage . . . . .	28
	2.7.1 Plat . . . . .	28
	2.7.2 Protocole base sur la localisation . . . . .	29
	2.7.3 Protocoles Hiérarchiques . . . . .	29

Categories . . . . .	30
2.8 Comparaion entre les protocoles de routage Hiérarchique . . . . .	32
2.9 Conclusion . . . . .	34
<b>3 SII : Système d'irrigation intelligent basé sur le RCSF</b>	<b>36</b>
3.1 Introduction . . . . .	36
3.2 Irrigation intelligente basée sur RCSF . . . . .	36
3.2.1 Exigence d'utilisation RCSF dans l'irrigation . . . . .	37
3.3 Architecture du Système . . . . .	37
3.4 Composants du système . . . . .	39
3.4.1 Unités de mesure . . . . .	39
Remarque . . . . .	39
3.4.2 Unité de collecte de données . . . . .	40
3.4.3 Unité de traitement . . . . .	40
3.4.4 Unité d'affichage . . . . .	40
3.5 Choix de Protocole de routage . . . . .	40
3.6 Processus du système d'irrigation . . . . .	42
3.7 Contraintes des RCSF en termes de temps et d'énergie . . . . .	44
3.7.1 Modèle de système . . . . .	44
3.7.2 Contrainte du temps . . . . .	45
3.7.3 Contrainte du l'énergie . . . . .	45
Collecte de l'énergie . . . . .	45
Stockage de l'énergie . . . . .	46
Consommation d'énergie . . . . .	47
3.7.4 Fonctionnement d'Opt-LEACH . . . . .	48
3.8 Conclusion . . . . .	48
<b>4 Implémentation et résultats</b>	<b>49</b>
4.1 Introduction . . . . .	49
4.2 Les outils utilisees . . . . .	49
4.2.1 OMNeT++ –version 5.2.1– . . . . .	49
4.3 Implémentation . . . . .	50
4.3.1 Comportement du protocole de routage opt_LEACH . . . . .	50

Transmission du messages . . . . .	51
Recevoir du messages . . . . .	51
Remarque . . . . .	52
4.3.2 Visualisation du RCSF . . . . .	52
4.3.3 Structure de message . . . . .	53
4.3.4 Paramètres utilisés . . . . .	54
4.4 Résultats obtenus . . . . .	54
4.4.1 Consommation d'énergie . . . . .	54
4.4.2 Nombre de nœuds morts . . . . .	55
4.4.3 Throughput . . . . .	56
Remarque . . . . .	56
4.4.4 Messages au niveau de "Sink" . . . . .	57
4.4.5 Nombre des Clusters . . . . .	58
4.5 Conclusion . . . . .	58
<b>Conclusion Générale</b>	<b>60</b>

## Table des figures

1.1	Anatomie d'un noeud capteur . . . . .	5
1.2	Architecture de communication de RCSF . . . . .	9
1.3	Couches des RCSF . . . . .	10
1.4	Comparison . . . . .	18
2.1	L'irrigation goutte à goutte . . . . .	22
2.2	L'irrigation par aspersion . . . . .	23
2.3	Irrigation à pivot central . . . . .	24
2.4	L'irrigation par sillons . . . . .	24
2.5	L'irrigation en terrasse . . . . .	25
2.6	Conception RCSF et organisation des composants d'un nœud capteur	25
2.7	Taxonomie des protocoles de routage hiérarchique pour les RCSF .	30
2.8	Comparaison entre les protocoles hiérarchiques. . . . .	32
3.1	Architecture de communication de RCSF pour le SII . . . . .	38
3.2	Composants du système proposé . . . . .	39
3.3	Protocole LEACH . . . . .	41
3.4	Cycle de vie de notre système d'irrigation intelligent. . . . .	42
3.5	Diagramme de séquence de notre système d'irrigation intelligent (SII)	43
3.6	Utilisation de l'énergie solaire dans RCSF . . . . .	46
4.1	OMNeT++ . . . . .	50
4.2	Visualisation du RCSF en cours d'exécution . . . . .	52
4.3	Structure de message LEACH . . . . .	53
4.4	Consommation d'énergie . . . . .	54
4.5	Nombre de nœuds morts après l'application de LEACH vs Opt-LEACH	55
4.6	Taux de livraison des messages sur un canal de communication . . .	56

4.7	Nombre de messages reçues par Sink . . . . .	57
4.8	Nombre des clusters . . . . .	58

# Liste des Algorithmes

1	Procédure de transmission du messages . . . . .	51
2	Procedure de recevoir messages par CH . . . . .	51

# Liste des Abréviations

<b>RCSF</b>	<b>R</b> éseau de <b>C</b> apteur <b>S</b> ans <b>F</b> ils
<b>MANET</b>	<b>M</b> obile <b>A</b> d-hoc <b>N</b> etwork
<b>CH</b>	<b>C</b> luster <b>H</b> ead
<b>QoS</b>	<b>Q</b> uality <b>O</b> f <b>S</b> ervice
<b>SII</b>	<b>S</b> ystème d'Irrigation <b>I</b> ntelligente
<b>MEMS</b>	<b>M</b> icro <b>E</b> lectro <b>M</b> echanical <b>S</b> ystem
<b>LEACH</b>	<b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptive <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>PEGASIS</b>	<b>P</b> ower <b>E</b> fficient <b>L</b> Gathering in <b>S</b> ensor <b>I</b> nformation <b>S</b> ystems
<b>TEEN</b>	<b>T</b> hreshold <b>S</b> ensitive <b>E</b> nergy <b>E</b> fficient <b>S</b> ensor <b>N</b> etwork <b>L</b> Protocol
<b>APTEEN</b>	<b>A</b> daptive <b>T</b> hreshold <b>S</b> ensitive <b>E</b> nergy <b>E</b> fficient <b>S</b> ensor <b>N</b> etwork <b>P</b> rotocol
<b>TTDD</b>	<b>T</b> wo- <b>T</b> ier <b>D</b> ata <b>D</b> issemination
<b>WCTT</b>	<b>W</b> orst <b>C</b> ase <b>T</b> ransmission <b>T</b> ime
<b>EDF</b>	<b>E</b> arliest <b>D</b> eadline <b>F</b> irst

# Introduction Générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont une nouvelle classe de réseaux sans fil qui deviennent très populaires avec un grand nombre d'applications civiles et militaires. Un RCSF est un réseau sans fil qui contient des dispositifs de capteurs indépendants distribués destinés à surveiller des conditions physiques ou environnementales. Un RCSF se compose d'un ensemble de minuscules noeuds de capteurs connectés, qui communiquent entre eux et échangent des informations et des données. Ces noeuds obtiennent des informations sur l'environnement telles que la température, la pression, l'humidité ou les polluants, et envoient ces informations à une station de base. Cette dernière envoie les informations à un réseau câblé ou active une alarme ou une action, en fonction du type et de l'ampleur des données contrôlées [1].

Les applications RCSF peuvent faciliter et résoudre les problèmes majeurs auxquels les hommes sont confrontés en ce moment, l'une des principales applications de RCSF est le champ d'irrigation intelligent où les capteurs peuvent collecter les données en continu sur l'état de santé des plantes, et après cela vient le travail du protocole de routage afin d'organiser la communication et le passage des données entre les noeuds pour finalement arriver à l'unité de traitement pour évaluer l'état des plantes en fonction des données. Le travail du protocole de routage est très important car les protocoles de routage deviennent nécessaires dans les réseaux de capteurs sans fil. Néanmoins, l'inclusion d'un protocole de routage dans un réseau de capteurs sans fil n'est pas une tâche triviale. L'une des principales limitations est l'identification des noeuds. Les réseaux de capteurs sans fil étant constitués d'un nombre important de noeuds, l'attribution manuelle d'identifiants uniques devient infaisable [2].

L'application du RCSF dans le domaine de l'irrigation aura un impact énorme puisque la gestion de l'eau est primordiale dans les pays où l'eau est rare. Cela concerne également l'agriculture, car une grande quantité d'eau est consacrée à cet

usage. Les conséquences possibles du réchauffement climatique conduisent à envisager la création de mesures d'adaptation à l'eau afin de garantir la disponibilité de l'eau pour la production et la consommation alimentaires. Ainsi, les études visant à économiser l'eau utilisée dans le processus d'irrigation se sont multipliées au fil des ans [3].

D'autre part, l'utilisation de RCSF dans le domaine de l'irrigation aidera notre pays l'Algérie à résoudre les différents problèmes pare ce que l'irrigation en Algérie, a toujours été un impératif et un instrument privilégié pour assurer l'accroissement de la production agricole, la mobilisation et l'utilisation optimale de l'eau sont les fondements de l'hydraulique agricoles qui relève depuis 1999 [3].

Dans cette mémoire, nous avons proposé une extension d'un protocole de routage existant appelé LEACH et l'avons optimisé afin de respecter une contrainte spécifique qui sont : Le temps réel et la consommation d'énergie afin de garantir le respect de la QoS pour l'appliquer dans un système d'irrigation intelligent que nous avons conçu dans le manuscrit de mémoire.

### **Organization du mémoire**

- Chapitre 1 Ce chapitre représente une introduction au domaine des réseaux de capteurs sans fil, nous retraçons les principales notions de base des réseaux de capteurs telles que l'architecture matérielle et logicielle du noeud capteur, et nous présentons les facteurs et les contraintes pour la conception d'un RCSF et quelque domaine d'application, nous terminons le chapitre par une petite comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux Ad-Hoc classiques.
- Chapitre 2 Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types de systèmes d'irrigation existants en exposant les principaux problèmes auxquels est confronté le style d'irrigation traditionnel et la nécessité de passer au système d'irrigation intelligent qui est basé sur l'utilisation de RCSF.
- Chapitre 3 : Dans ce chapitre, nous allons concevoir le système que nous proposons, qui est un système d'irrigation intelligent basé sur RCSF, en présentant le protocole de routage utilisé dans ce système, en présentant le type de messages qui seront utilisés, le modèle du système, les contraintes que notre système doit respecter avec une formule spécifique pour chaque contrainte.

- Chapitre 4 : Ce chapitre est dédié à l'implémentation de notre nouvelle extension du protocole de routage, nous avons également présenté la métrique d'évaluation utilisée pour évaluer notre approche par rapport à la version originale avec les résultats de simulation entre les deux protocoles.

Enfin, nous terminons cette mémoire par une conclusion globale qui rappelle les techniques et les protocoles utilisés dans notre système, elle présente également nos perspectives d'avenir pour ce projet.

# Chapitre 1

## Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils

### 1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil(RCSF) sont largement considérés comme l'une des technologies les plus importantes du XXIe siècle. Grâce aux progrès récents des systèmes microélectroniques et mécaniques (MEMS) et des technologies de communication sans fil, des capteurs minuscules, bon marché et intelligents, déployés dans une zone physique et mis en réseau par des liaisons sans fil et l'internet, offrent des possibilités sans précédent pour toute une série d'applications civiles et militaires, par exemple la surveillance de l'environnement, la surveillance des champs de bataille et le contrôle des processus industriels [4]. Distingués des réseaux de communication sans fil traditionnels, par exemple les systèmes cellulaires et les réseaux mobiles ad hoc (MANET), les RCSF présentent des caractéristiques uniques, par exemple des nœuds plus denses et des contraintes sévères en matière d'énergie, de calcul et de stockage. Ces caractéristiques présentent de nombreux défis pour le développement et l'application des RCSF. Au cours de la dernière décennie, les RCSF ont fait l'objet d'une attention considérable de la part des universitaires et des industriels du monde entier. De nombreuses activités de recherche ont été menées pour explorer et résoudre divers problèmes de conception et d'application, et des avancées significatives ont été réalisées dans le développement et le déploiement des RCSF. On prévoit que, dans un avenir proche, les RCSF seront largement utilisés dans divers domaines civils et militaires et qu'ils révolutionneront notre façon de vivre, de travailler et d'interagir

avec le monde physique [5].

## 1.2 Noeud Capteur

### 1.2.1 Définition

Un noeud capteur est un dispositif destiné à mesurer une donnée environnementale comme la température, ou capturer une image, et de la transformer en information utilisable puis de la transmettre à une unité de traitement de façon analogique ou numérique. 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 ou Sink en Anglais [6].

### 1.2.2 Anatomie d'un noeud capteur

Nous supposons qu'un nœud de capteur est un dispositif qui possède trois capacités de base : sensorielle, informatique et communication sans fil, comme l'illustre la figure 1.1. La capacité sensorielle est nécessaire pour acquérir des données de l'environnement, la capacité de calcul est nécessaire pour agréger les données, traiter les informations de contrôle et gérer l'activité sensorielle et de communication.

Enfin, la capacité de communication sans fil est nécessaire pour envoyer (recevoir) les données agrégées et les informations de contrôle vers (depuis) d'autres capteurs ou récepteur [7].

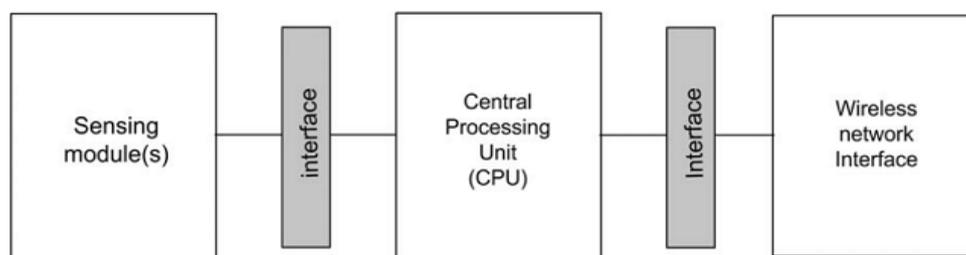


FIGURE 1.1 – Anatomie d'un noeud capteur [7]

Nous supposons que les nœuds de capteurs individuels fonctionnent sous réserve des contraintes fondamentales suivantes :

1. Les nœuds de capteurs sont anonymes - ils n'ont pas d'identité de fabrication.
2. Les nœuds de capteurs sont de minuscules dispositifs de base produits en masse dans un environnement où les tests sont un luxe.
3. Chaque capteur dispose d'un budget d'énergie non renouvelable ; lorsque l'alimentation embarquée est épuisée, le nœud de capteur est périmé.
4. Afin d'économiser de l'énergie, chaque nœud de capteurs est en mode veille la plupart du temps, se réveillant à des moments aléatoires pour de courts intervalles sous le contrôle d'une minuterie interne.
5. chaque capteur a une portée de transmission modeste, peut-être quelques mètres. Cela implique que les messages sortants envoyés par un capteur ne peuvent atteindre que les capteurs à sa proximité, soit généralement une petite fraction des capteurs déployés.
6. Les nœuds de capteurs individuels doivent fonctionner sans surveillance - une fois déployés, il est soit infaisable soit peu pratique de consacrer de l'attention à des nœuds de capteurs individuels.

### 1.3 Définition de RCSF

Un RCSF est constitué d'un ensemble de capteurs répartis sur une zone géographique. Un réseau de capteurs sans fil est composé de capteurs déployés sur un champ (ou une région géographique) d'intérêt. Il recueille et génère des données sur des phénomènes spécifiques et les transmet à un nœud spécifique, appelé station de base (ou puits). Le réseau de capteurs sans fil possède de multiples capacités fondamentales dues à la fonctionnalité du capteur [8].

### 1.4 Caractéristiques des RCSF

Un RCSF se compose généralement d'un grand nombre de nœuds de capteurs à faible coût, à faible puissance et multifonctionnels qui sont déployés dans une région d'intérêt. Ces nœuds de capteurs sont de petite taille, mais ils sont équipés de capteurs, de microprocesseurs intégrés et d'émetteurs-récepteurs radio, et ont donc

non seulement une capacité de détection, mais aussi des capacités de traitement des données et de communication. Mais aussi des capacités de traitement des données et de communication. Ils communiquent sur de courtes distances via un support sans fil. Par rapport aux réseaux de communication sans fil traditionnels, par exemple les systèmes cellulaires et les MANET, les réseaux de capteurs présentent les caractéristiques et les contraintes uniques suivantes [5] :

- **Déploiement dense des nœuds** : les nœuds de capteurs sont généralement déployés de manière dense dans un champ d'intérêt. Le nombre de nœuds de capteurs dans un réseau de capteurs peut être plusieurs ordres de grandeur plus élevé que dans un MANET.
- **Nœuds de capteurs alimentés par batterie** : les nœuds de capteurs sont généralement alimentés par batterie. Dans la plupart des cas, ils sont déployés dans un environnement difficile ou hostile, où il est très difficile, voire impossible, de changer ou de recharger les batteries.
- **Contraintes sévères en matière d'énergie, de calcul et de stockage** : Les nœuds de capteurs sont fortement limités en énergie, en capacités de calcul et de stockage.
- **Auto configurable** : Les nœuds de capteurs sont généralement déployés de manière aléatoire, sans planification ni ingénieries minutieuses. Une fois déployés, les nœuds de capteurs doivent se configurer de manière autonome en un réseau de communication.
- **Application spécifique** : les réseaux de capteurs sont spécifiques à une application. Un réseau est généralement conçu et déployé pour une application spécifique. Les exigences de conception d'un réseau changent avec son application.
- **Nœuds de capteurs peu fiables** : Les nœuds de capteurs sont généralement déployés dans des environnements difficiles ou hostiles et fonctionnent sans assistance. Ils sont sujets à des dommages physiques ou à des pannes.
- **Changement fréquent de topologie** : La topologie du réseau change fréquemment en raison de la défaillance, de l'endommagement ou de l'ajout de nœuds, de l'épuisement de l'énergie ou de l'évanouissement des canaux.

- **Pas d'identification globale** : En raison du grand nombre de nœuds de capteurs, il n'est généralement pas possible de construire un schéma d'adressage global pour un réseau de capteurs car cela introduirait une surcharge élevée pour la maintenance de l'identification.
- **Modèle de trafic biunivoque** : Dans la plupart des applications de réseaux de capteurs, les données détectées par les nœuds de capteurs s'écoulent de plusieurs nœuds de capteurs sources vers un récepteur particulier, présentant un modèle de trafic de plusieurs à un.
- **Redondance des données** : dans la plupart des applications de réseaux de capteurs, les nœuds de capteurs sont déployés de manière dense dans une région d'intérêt et collaborent pour accomplir une tâche de détection commune. Ainsi, les données captées par plusieurs nœuds de capteurs présentent généralement un certain niveau de corrélation ou de redondance.

Ces caractéristiques et contraintes uniques présentent de nombreux nouveaux défis pour la conception des réseaux.

## 1.5 Architecture des réseaux de capteur sans fils

### 1.5.1 Architecture de communication d'un RCSF

Un RCSF est un type spécial de réseau ad hoc défini par un ensemble coopérant de nœuds capteurs déployés dans une zone géographique appelée zone de captage, ou zone d'intérêt (sensor field), afin de surveiller un phénomène physique et de récolter leurs données d'une manière autonome. Les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées vers un nœud collecteur appelé nœud puits (sink), ou station de base (base station). Ce dernier est un point de collecte de données capturées. Il peut communiquer les données collectées à l'utilisateur à travers un réseau de communication, éventuellement l'Internet ou satellite [6]. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau. Cette architecture est illustrée dans la Figure 1.2.

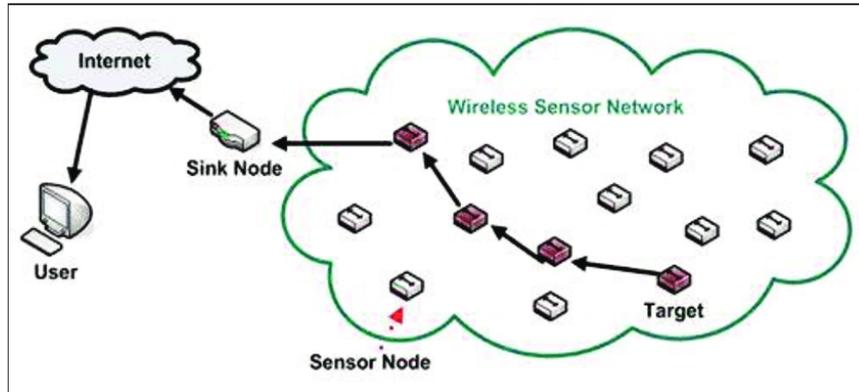


FIGURE 1.2 – Architecture de communication de RCSF [9]

### 1.5.2 Architecture logicielle(Pile Protocolaire)

Les RCSF utilisent une architecture de communication en couches, ce sont les cinq premières couches du modèle OSI(Open Systems Interconnection). Chaque couche a son propre rôle et ses propres protocoles pour atteindre son objectif [10].

- **Couche d'application** : Responsable de la gestion du trafic et fournit des logiciels pour différentes applications qui traduisent les données sous une forme compréhensible ou envoient des requêtes pour obtenir certaines informations. Les réseaux de capteurs sont déployés dans diverses applications dans différents domaines, par exemple dans les domaines militaire, médical, environnemental et agricole.
- **Couche de transport** : La fonction de cette couche est de fournir la fiabilité et l'évitement de la congestion. Ces protocoles utilisent différents mécanismes pour la détection et la récupération des pertes.
- **Couche réseau** : La fonction de cette couche est le routage. Les principaux défis se situent au niveau de l'économie d'énergie, de la mémoire et des tampons limités ; les capteurs n'ont pas d'identification globale et doivent être auto-organisés. L'idée de base du protocole de routage est de définir un chemin fiable et des chemins redondants en fonction d'une certaine échelle appelée métrique, qui diffère d'un protocole à l'autre.
- **Couche de liaison de données** : Responsable du multiplexage des flux de données, de la détection des trames de données, du MAC et du contrôle des erreurs, elle assure la fiabilité des liaisons point à point ou point à multipoint.

- **Couche physique** : Peut fournir une interface pour transmettre un flux de bits sur un support physique. Responsable de la sélection de la fréquence, de la génération de la fréquence porteuse, de la détection du signal, de la modulation et du cryptage des données.

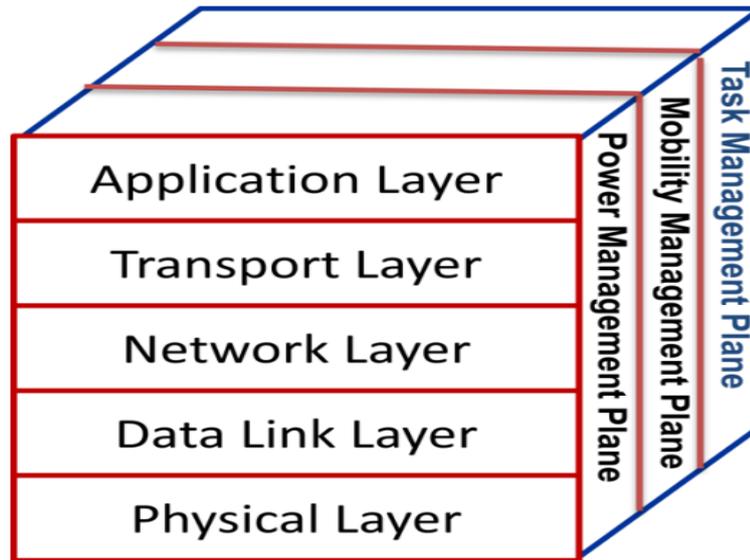


FIGURE 1.3 – RCSF- Pile de protocol [11]

## 1.6 Types de RCSF

Il existe cinq types de RCSF :

- **RCSF terrestres** : Les RCSF sont généralement constitués de centaines à des milliers de nœuds de capteurs sans fil peu coûteux déployés dans une zone donnée, soit de manière pré-planifiée, soit de manière ad-hoc. Dans le cas d'un déploiement préplanifié, il existe des modèles de placement en grille, de placement optimal, de placement à deux et à trois dimensions. Dans le cas d'un déploiement ad hoc, les nœuds de capteurs peuvent être lâchés d'un avion et placés de manière aléatoire dans la zone cible.
- **RCSF souterrains** : L'RCSF-S se compose d'un certain nombre de nœuds de capteurs enterrés sous terre, dans une grotte ou une mine, qui sont utilisés pour surveiller les conditions souterraines. Des nœuds puits supplémentaires sont situés en surface pour relayer les informations des nœuds capteurs à la

- station de base. Un RCSF souterrain est généralement plus coûteux qu'un RCSF terrestre en termes d'équipement, de déploiement et de maintenance.
- **RCSF sous-marins** : Ils sont constitués de plusieurs nœuds de capteurs et de véhicules qui sont déployés sous l'eau. Par rapport aux RCSF terrestres, les nœuds de capteurs sous-marins sont plus coûteux et le nombre de nœuds de capteurs déployés est plus faible. Les véhicules sous-marins autonomes sont utilisés pour l'exploration ou la collecte de données à partir des nœuds de capteurs. Par rapport à un déploiement dense de nœuds de capteurs dans un réseau Terrestre-RCSF(T-RCSF), un déploiement clairsemé de nœuds de capteurs est placé sous l'eau. Les communications sans fil sous-marines typiques sont établies par la transmission d'ondes acoustiques.
  - **RCSF multimédias** : Ils ont été proposés pour permettre la surveillance et le suivi d'événements sous forme de multimédia. Les RCSF multimédias se composent de plusieurs nœuds de capteurs à faible coût équipés de caméras et de microphones. Ces nœuds sont généralement interconnectés entre eux par une connexion sans fil pour la récupération, le traitement, la corrélation et la compression des données. Les nœuds de capteurs multimédias sont généralement déployés de manière planifiée dans l'environnement pour garantir la couverture. Les défis de ce type de RCSF comprennent une forte demande de bande passante, une consommation d'énergie élevée, la fourniture de la qualité de service (QoS), les techniques de traitement et de compression des données et la conception inter couche.
  - **RCSF mobiles** : Les RCSF-M se composent d'un certain nombre de nœuds de capteurs qui peuvent se déplacer seuls et interagir avec l'environnement physique. Les nœuds mobiles ont la capacité de détecter, de calculer et de communiquer comme des nœuds statiques. Les nœuds mobiles ont également la capacité de se repositionner et de s'organiser dans le réseau. Un RCSF mobile peut commencer par un déploiement initial et les nœuds peuvent ensuite se disperser pour recueillir des informations. Les informations recueillies par un nœud mobile peuvent être communiquées à un autre lorsqu'ils sont à portée l'un de l'autre. Une autre différence essentielle concerne la distribution des données. Dans un RCSF statique, les données peuvent être distribuées à

l'aide d'un routage fixe ou par inondation, tandis que dans un RCSF mobile, le routage dynamique est utilisé. Les défis de ce type de RCSF sont le déploiement, la localisation, l'auto-organisation, la navigation et le contrôle, la couverture, l'énergie, la maintenance et le traitement des données [12].

## 1.7 Domaines d'application des RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil ont inspiré de nombreuses applications. Certaines d'entre elles sont futuristes, tandis qu'un grand nombre d'entre elles ont une utilité pratique. La diversité des applications de cette dernière catégorie est remarquable : surveillance des environnements, suivi des cibles, surveillance des pipelines (eau, pétrole, gaz), surveillance de l'état des structures, agriculture de précision, soins de santé, gestion de la chaîne d'approvisionnement, surveillance active des volcans, transport, surveillance de l'activité humaine et exploitation minière souterraine, pour n'en citer que quelques-unes [13].

### 1.7.1 Agriculture

L'agriculture de précision est un autre domaine intéressant où les réseaux de capteurs sans fil ont motivé un grand nombre de chercheurs. Traditionnellement, une grande ferme est considérée comme un champ homogène en termes de répartition des ressources et de réaction au changement climatique, aux mauvaises herbes et aux parasites. En conséquence, les agriculteurs gèrent les engrais, les pesticides, les herbicides et les ressources en eau. En réalité, un grand champ présente une grande diversité spatiale dans le type de sol, la teneur en nutriments et d'autres facteurs importants. Par conséquent, le traiter comme un champ uniforme peut entraîner une utilisation inefficace des ressources et une perte de productivité [13]. Un grand nombre de technologies ont été développées au cours des dernières années pour faciliter et automatiser l'agriculture de précision. En voici quelques-unes :

- Les moniteurs de rendement
- Cartographie des rendements
- Engrais à taux variable

- Cartographie des mauvaises herbes
- Pulvérisation variable
- Topographie et limites
- Cartographie de la salinité
- Systèmes de guidage

### 1.7.2 Transports

Les statistiques instantanées sur le trafic sont composées par les RCSF pour forger ultérieurement des modèles de transport et tenir les conducteurs en alerte sur d'éventuels embouteillages et difficultés de circulation [14].

### 1.7.3 Militaires

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent faire partie intégrante des systèmes militaires de commandement, de contrôle, de communication, d'informatique, de renseignement, de surveillance, de reconnaissance et de ciblage (C4ISRT). Certaines des applications militaires des réseaux de capteurs sont la surveillance des forces, équipements et munitions amis ; la surveillance du champ de bataille ; la reconnaissance des forces et terrains du champ de bataille, la reconnaissance des forces et du terrain adverses, le ciblage, l'évaluation des dommages causés par la bataille, la détection et la reconnaissance des attaques nucléaires, biologiques et chimiques (NBC). NBC et la détection et la reconnaissance des attaques. [15]

## 1.8 Problèmes des RCSF

Les RCSF sont confrontés à une variété de problèmes que nous pouvons séparer en deux domaines principaux :

### 1.8.1 Les défis du routage dans les RCSF

La tâche de conception des protocoles de routage pour les RCSF est assez difficile en raison de multiples caractéristiques, qui les différencient des réseaux sans fil sans infrastructure. Plusieurs types Plusieurs types de défis de routage sont impliqués dans

les réseaux de capteurs sans fil. Certains des défis importants sont mentionnés ci-dessous : [16]

- Il est presque difficile d’attribuer un schéma d’identification universel pour une grande quantité de nœuds de capteurs. Ainsi, les nœuds de capteurs sans fil ne sont pas capables d’utiliser les protocoles classiques basés sur IP.
- Le flux de données détectées est obligatoire depuis un certain nombre de sources vers une station de base spécifique. Mais cela ne se produit pas dans les réseaux de communication classiques.
- - Le trafic de données créé présente une redondance importante dans la plupart des cas. En effet, plusieurs nœuds de détection peuvent générer les mêmes données pendant la détection. Il est donc essentiel d’exploiter cette redondance par les protocoles de routage et d’utiliser la bande passante et l’énergie disponibles aussi efficacement que possible.

### 1.8.2 Problèmes de design

Un nœud de capteurs à plusieurs fonctionnalités. La plus importante est sa capacité à détecter les offres et l’environnement. Un capteur possède également une fonctionnalité de calcul, qui lui permet de traiter des données et de les enregistrer dans sa mémoire. En outre, un capteur traite une capacité de communication, qui lui permet de transmettre et de recevoir des données à/de ses voisins. Néanmoins, il est soumis à de sévères contraintes de ressources, telles qu’une faible puissance de batterie, un traitement du signal limité, des capacités de calcul, de communication et de détection limitées, et un petit espace de stockage [8].

### 1.8.3 Coût de production

Comme les réseaux de capteurs sont constitués d’un grand nombre de nœuds de capteurs, le coût d’un seul nœud est très important pour justifier le coût global des réseaux. des réseaux. Si le coût du réseau est plus élevé que le déploiement de capteurs traditionnels, le réseau de capteurs n’est pas justifié en termes de coût. Par conséquent, le coût de chaque nœud de capteur doit rester faible. L’état actuel de la technologie permet à un système radio Bluetooth de coûter moins de 10 \$ . De même,

le prix d'un PicoNode devrait être inférieur à 1 \$. Le coût d'un nœud de capteur doit être bien inférieur à 1 \$ pour que le réseau de capteurs soit réalisable. Le coût d'une radio Bluetooth, qui est connue pour être un dispositif à faible coût, est même 10 fois plus cher que le prix ciblé pour un nœud de capteurs. Il convient de noter qu'un nœud de capteurs possède également des unités supplémentaires, telles que des unités de détection et de traitement. En outre, il peut être équipé d'un système de localisation, d'un mobilisateur ou d'un générateur d'énergie, selon les applications des réseaux de capteurs. Par conséquent, le coût d'un nœud de capteurs est une question très difficile étant donné la quantité de fonctionnalités dont le prix est bien inférieur à un dollar [15].

### **Sécurité**

Les réseaux de capteurs sont constitués d'un très grand nombre de nœuds, de sorte que la surveillance de chacun d'entre eux est pratiquement impossible. Par conséquent, les réseaux de capteurs sont très sensibles aux attaques logiques et physiques et à l'interception des communications [15].

### **Déploiement des Adhoc**

De nombreuses applications de réseaux de capteurs sans fil ne nécessitent pas d'emplacements prédéterminés et étudiés pour les nœuds de capteurs individuels. Cela est particulièrement important pour les réseaux déployés dans des zones éloignées ou inaccessibles. Par exemple, les capteurs servant à l'évaluation des champs de bataille ou des zones sinistrées pourraient être lancés depuis des avions au-dessus des zones concernées, mais de nombreux nœuds de capteurs risquent de ne pas survivre à une telle chute et de ne jamais pouvoir commencer leurs activités de détection [13].

### **Qualité de service (Qos)**

La principale fonctionnalité du réseau est la détection d'événements spécifiques et la transmission des données collectées par les nœuds de capteurs au puits. Pour certaines applications de détection avec des délais stricts, il est important que les

données collectées soient transférées dans certains intervalles de temps. Sinon, les données deviennent inutilisables et le réseau ne fonctionne pas correctement. En outre, la couverture et la connectivité sont considérées comme des valeurs clés pour déterminer la qualité de service du réseau sous-jacent [8].

### **Délai**

Certaines applications nécessitent une réaction ou une réponse instantanée sans délai important, comme les capteurs de température ou la surveillance des alarmes, etc. Le protocole de routage doit donc offrir un délai minimal. Le temps nécessaire pour transmettre les données détectées doit être le plus court possible dans les applications RCSF citées ci-dessus [16].

### **Robustesse**

Les réseaux de capteurs sans fil sont fréquemment déployés dans des environnements très cruciaux et perdus. Occasionnellement, un nœud de capteur peut expirer ou quitter le réseau de capteurs sans fil. Ainsi, le protocole de routage doit être capable d'accepter toutes sortes d'environnements, y compris des environnements sévères et de perte. La fonctionnalité du protocole de routage doit également être fine [16].

## **1.8.4 Problèmes de topologie**

- Routage géographique : Le routage géographique est un principe de routage qui s'appuie sur des informations de position géographique. Il est principalement proposé pour les réseaux sans fil et repose sur l'idée que la source envoie un message à l'emplacement géographique de la destination au lieu d'utiliser l'adresse du réseau.
- Trous de détection : Un trou de routage consiste en une région dans le réseau de capteurs, où un nœud n'est pas disponible ou les nœuds disponibles ne peuvent pas participer au routage réel des données pour diverses raisons possibles. La tâche d'identification des trous est particulièrement difficile car

les réseaux de capteurs sans fil typiques sont constitués de nœuds légers et de faible capacité qui ignorent leur emplacement géographique.

- Topologie de couverture : Le problème de couverture reflète le degré de surveillance ou de suivi d'une zone par les capteurs. Les problèmes de couverture et de connectivité dans les réseaux de capteurs ont fait l'objet d'une attention considérable dans la communauté des chercheurs ces dernières années. Ce problème peut être formulé comme un problème de décision, dont le but est de déterminer si chaque point de la zone de service du réseau de capteurs est couvert par au moins  $k$  capteurs, où  $k$  est un paramètre donné [12].

## 1.9 Différence entre RCSF et Ad hoc

De nos jours, les technologies sans fil ont connu un développement rapide, et les RCSF en font partie. Un déploiement de plusieurs dispositifs équipés de capteurs et il a été considéré comme un type spécial de réseau ad hoc qui apporte une perspective intéressante. Il peut être rapidement déployé par un ensemble d'ordinateurs sans fil dans un réseau de communication radio par paquets à bonds multiples sans l'aide d'une infrastructure établie. Ou bien, il peut n'être équipé que d'une puissance limitée et les nœuds de capteurs sans fil peuvent effectuer un processus de mesure en collaboration. Dans ce réseau, l'utilisation de la transmission sans fil en milieu ouvert reste la chose la plus importante pour rendre l'information accessible à l'utilisateur. En bref, les réseaux as-hoc sans fil peuvent être utilisés dans des zones particulières où l'infrastructure des réseaux câblés peut être inadaptée [14].

- La densité des nœuds déployés est beaucoup plus élevée dans les réseaux de capteurs.
- Les nœuds de capteurs ont une capacité limitée en énergie et en mémoire.
- La topologie des réseaux de capteurs est souvent dynamique
- La communication entre les nœuds se fait par diffusion et non point par point dans un réseau de capteurs.
- Les capteurs peuvent ne pas avoir d'identifiant global en raison du grand nombre de nœuds.

RCSF	Réseau Adhoc sans fils
Utilise le position d'information pour routage	Utiliser un schéma d'adressage global, un routage basé sur IP.
Les données se déplacent vers le nœud récepteur	la paire source destination change constamment
Les données sont filtrées ou agrégées en raison de la redondance	Pas besoin d'agrégation
Changements topologiques rapides dus à la mobilité et à la défaillance des nœuds	les changements topologiques ne sont pas fréquents

FIGURE 1.4 – Réseau Adhoc vs RCSF [17]

## 1.10 Conclusion

Les réseaux de capteurs ont parcouru un long chemin depuis leurs obscurs débuts militaires jusqu'à devenir un sujet de recherche important et largement discuté, et au XXI<sup>e</sup> siècle, les premières applications quotidiennes apparaissent lentement. Les nœuds de capteurs étant en fait de petits ordinateurs dotés d'une grande capacité d'interconnexion, de nombreuses solutions développées pour les ordinateurs traditionnels (telles que le routage, la synchronisation temporelle et la sécurité) peuvent être réutilisées, mais avec des adaptations substantielles en raison d'une puissance de traitement nettement inférieure et de tailles de mémoire réduites de plusieurs ordres de grandeur. En revanche, d'autres concepts, comme le positionnement et la localisation, n'ont jamais été nécessaires dans les ordinateurs traditionnels et ont donc dû être développés à partir de zéro.

## Chapitre 2

# L'utilisation des RCSF dans le domaine d'irrigation

### 2.1 Introduction

La civilisation humaine du monde entier se prépare à une explosion démographique qui devrait atteindre un total de 10 milliards d'habitants d'ici 2050 [18]. Il a été estimé que la production alimentaire mondiale doit augmenter d'au moins 70 % au cours des prochaines années pour suivre le rythme de cette croissance. Au fil des ans, les méthodes agricoles ne se sont pas beaucoup améliorées et les agriculteurs utilisent toujours des stratégies conventionnelles basées sur les attentes des besoins nutritionnels de la culture. Fournir le même apport en nutriments à l'ensemble de l'exploitation n'est plus le meilleur choix, car cela entraîne une forte utilisation d'engrais et de pesticides, une consommation d'eau inutile, une dégradation de l'environnement et des coûts d'exploitation élevés. L'irrigation extensive consomme environ 70 % de l'eau mondiale. Les secteurs industriel et domestique représentent respectivement 13% et 20%, bien que cette variation de pourcentage soit considérable d'un pays à l'autre. La loi de 1947 définit l'agriculture comme incluant l'élevage du bétail, la production laitière, l'horticulture, la culture des semences et la culture des fruits [19].

Dans ce chapitre, nous allons introduire les problèmes auxquels l'irrigation est confrontée, puis nous présenterons les scénarios parfaits d'utilisation de l'irrigation dans le RCSF. Après cela, nous présenterons le principal défi auquel est confronté le RCSF, à savoir la consommation d'énergie par nœud. Nous discuterons ensuite des

différents protocoles de routage utilisés dans les RCSF et ferons une comparaison entre eux. Enfin, nous présenterons une brève conclusion afin de trouver le meilleur protocole de routage en termes de consommation d'énergie et de qualité de service.

## 2.2 Problèmes d'irrigation

Dans le monde en développement, l'eau allouée à l'irrigation représente environ (ou dépasse) 69% des ressources en eau . Compte tenu de la concurrence domestique accrue pour les ressources et de la nécessité d'accroître la production agricole pour assurer la sécurité alimentaire, une telle fraction n'est pas viable. [20]

Par conséquent, la sécurité de l'eau ne pourra être garantie à l'avenir que par une augmentation considérable de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. En conséquence, la demande de nouvelles techniques d'irrigation économes en eau augmente rapidement. Pour produire "plus de récolte par goutte", les producteurs des régions (semi-) arides explorent actuellement des techniques d'irrigation allant de l'utilisation de moins d'eau douce à l'utilisation de ressources en eau marginales comme l'eau recyclée des ménages. Ce faisant, ils entrent dans le domaine de la production de cultures dans des conditions sous-optimales ou même stressantes pour la culture, communément appelée irrigation déficitaire. Ainsi, la marge dont dispose le cultivateur pour contrôler sa culture se réduit, et les informations sur l'état réel de la culture jouent un rôle crucial. La teneur en eau du sol ou la tension de l'eau du sol ainsi que la conductivité électrique (CE) sont des paramètres importants à surveiller, car les sols hautement salins entraînent un stress des cultures et une réduction du rendement. [20]

- L'infiltration dans les drains entraîne un gaspillage d'eau.
- Les machines ne peuvent pas être utilisées pour cette méthode car pendant la pulvérisation d'insecticides ou d'engrais, les parois en terre des bassins sont endommagées.
- Il y a un déséquilibre dans la distribution du travail. Après la croissance des cultures, l'eau atteint les bassins en quantité disproportionnée, ce qui entraîne un gaspillage d'eau.
- Création d'un problème d'engorgement [21].

## 2.3 L'utilisation de RCSF dans l'irrigation

### 2.3.1 Nécessité de l'irrigation automatique

- Économie d'énergie et de ressources à utiliser de manière précise.
- Installation facile du système sur le terrain.
- Appliquer la bonne quantité d'eau au bon moment.
- Pour que l'agriculteur puisse facilement contrôler l'irrigation de sa ferme et de sa pépinière.
- Les vannes sont utilisées dans les systèmes d'irrigation automatisés pour mettre en marche ou arrêter le moteur.
- La pompe ou le moteur peuvent être facilement actionnés à l'aide d'un contrôleur basé sur des capteurs et il n'est pas nécessaire de recourir à une main-d'œuvre quelconque pour gérer ou surveiller les systèmes d'irrigation. L'efficacité des cultures comprend l'amélioration de la réduction de l'arrosage excessif d'un sol saturé et l'évitement du mauvais moment d'irrigation pour économiser plus d'eau [19].

## 2.4 Les Types des systèmes d'irrigation

L'irrigation est essentielle pour soutenir la croissance des cultures agricoles. Compter sur la pluie n'est pas pratique, surtout en Australie où les précipitations peuvent être à la fois peu fiables et insuffisantes. Cependant, un arrosage excessif peut être tout aussi préjudiciable à la croissance des cultures. Le choix du bon système d'irrigation est donc l'une des étapes les plus importantes de la mise en place d'une exploitation agricole réussie. L'objectif de l'irrigation est de favoriser la croissance des plantes tout en minimisant l'érosion du sol et les pertes d'eau. Pour choisir le bon système d'irrigation, vous devrez avoir une connaissance du sol, de l'équipement, des espèces végétales et de la formation du terrain. [22] Voici les 5 types de systèmes d'irrigation les plus courants :

### 2.4.1 Irrigation goutte à goutte

Couramment utilisés dans les vergers, les vignobles et les cultures maraîchères de grande valeur, les systèmes d'irrigation goutte à goutte consistent en un réseau de tubes percés de petits trous ou émetteurs. Ils peuvent être placés au-dessus ou au-dessous de la surface du sol et font lentement couler l'eau dans le sol sur de longues périodes. [22]

- Utilise 30 à 50% d'eau en moins que les autres systèmes.
- Préviend l'érosion des sols et le ruissellement des nutriments.
- L'écoulement continu permet à l'eau de pénétrer profondément dans le sol et jusqu'aux racines.
- Contrôle la croissance fongique.
- Facile à modifier.



FIGURE 2.1 – L'irrigation goutte à goutte. [22]

### 2.4.2 L'irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion est une méthode d'application de l'eau d'irrigation qui produit un effet de pluie. L'eau est distribuée par un système de tuyaux, généralement par pompage. Elle est ensuite pulvérisée dans l'air et toute la surface du sol est irriguée par des têtes d'arrosage de sorte qu'elle se fragmente en petites gouttelettes d'eau qui tombent sur le sol [23].

- Abordable et facile à mettre en place.
- Permet une distribution uniforme de l'eau.

- Facile de couvrir de grandes surfaces.
- Arrosez au moment de la journée que vous avez choisi pour minimiser l'évaporation.



FIGURE 2.2 – L'irrigation par aspersion. [22]

### 2.4.3 Irrigation à pivot central

Un système d'irrigation à pivot central est autopulsé et fonctionne à l'aide d'un tuyau central avec des sorties tournant autour d'un point de pivot central. Il fonctionne comme le système d'irrigation par aspersion, mais il est beaucoup plus grand et est soutenu par des tours en acier ou en aluminium. [22]

- L'eau est distribuée uniformément.
- Couvre de grandes surfaces en peu de temps.
- Empêche l'écoulement de l'eau.
- Fonctionne à une pression plus faible, ce qui permet d'économiser de l'énergie.

### 2.4.4 Irrigation par sillons

L'irrigation par sillons utilise des sillons entre les billons plantés. Les champs peuvent être de formes diverses. D'abord, le sol est préparé en canaux verticaux (sillons) et en buttes de plantation. Ensuite, l'eau est libérée directement dans chaque sillon, s'écoulant sur toute la longueur du sillon et s'infiltrant dans le sol au niveau des racines. L'eau est fournie aux sillons à partir d'une conduite d'eau ou d'un fossé. Des tuyaux ou de petits tubes transportent l'eau du fossé vers chaque sillon [24].



FIGURE 2.3 – Irrigation à pivot central. [22]

- Donne généralement lieu à un rendement plus élevé.
- Coût d'installation faible.
- Gain de temps et de main-d'œuvre.
- Économiser de l'argent sur l'eau.



FIGURE 2.4 – L'irrigation par sillons [22].

### 2.4.5 Irrigation en terrasse

L'irrigation en terrasse est une pratique agricole ancienne qui existe encore aujourd'hui, généralement dans les régions montagneuses. Une série de marches est taillée dans le terrain en pente de sorte que, lorsqu'il pleut, l'eau s'écoule de la marche supérieure vers les marches suivantes en retenant les nutriments du sol. [22]

- Gérer l'écoulement de l'eau
- Empêche le ruissellement du sol.
- Améliore la fertilité du sol.

— Améliore la productivité des terres.



FIGURE 2.5 – L'irrigation en terrasse. [22]

## 2.5 Consommation d'énergie dans les RCSF

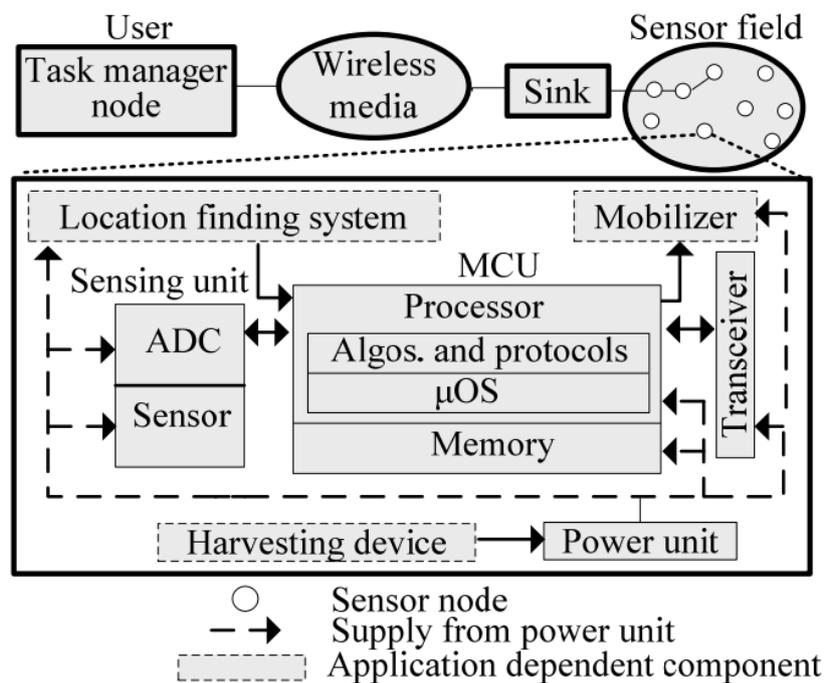


FIGURE 2.6 – Conception RCSF et organisation des composants d'un nœud capteur [17]

L'une des préoccupations les plus pressantes dans les RCSF est la conservation de l'énergie. En effet, les sources d'énergie sont souvent trop chères et, dans certains cas, impossibles à obtenir. Par conséquent, les capteurs doivent conserver l'énergie

le plus possible pour pouvoir fonctionner. En effet, un réseau de capteurs ne peut pas survivre si un nombre important de nœuds est perdu, car cela entraîne des pertes de communication en raison de la grande distance entre les nœuds restants.

Les batteries ont été utilisées pour alimenter les nœuds de capteurs. Par conséquent, ils doivent maintenir un faible bilan énergétique. Il est essentiel d'examiner d'abord les nombreux aspects qui causent la dissipation d'énergie dans un nœud de capteurs avant de concevoir des solutions éconergétiques. Les unités suivantes sont responsables de la majorité de la dissipation d'énergie [6] :

### 2.5.1 l'énergie de détection

L'unité de détection d'un nœud de capteurs comprend le capteur et/ou l'actionneur embarqué et le convertisseur analogique-numérique. Elle est responsable de la capture des caractéristiques physiques de l'environnement détecté et convertit ses mesures en signaux numériques, qui peuvent être traités par une unité de calcul/traitement [25].

L'énergie consommée pour la détection comprend :

- Échantillonnage du signal physique et conversion en signal électrique.
- Conditionnement du signal.
- Conversion analogique-numérique.

### 2.5.2 Energie de Calcul

L'unité de traitement est chargée de coder/décoder les paquets de données ainsi que de maintenir diverses tables (de voisinage, de routage, etc.) pour les protocoles de communication de la couche supérieure. La conception des algorithmes et des protocoles de communication va donc largement influencer l'énergie consommée par l'unité de traitement. L'énergie de traitement est divisée en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau du logiciel . L'énergie de fuite, quant à elle, est l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'unité de traitement consomme peu d'énergie par rapport à l'unité de communication. [6]

### 2.5.3 Energie de communication

L'unité de communication d'un nœud de détection consiste principalement en un circuit de fréquence radio à courte portée qui effectue la transmission et la réception de données. L'énergie de communication est le principal contributeur à la dépense énergétique totale et est déterminée par la quantité totale de communication et la distance de transmission. Le traitement local des données pour réduire la quantité de trafic peut permettre de réaliser d'importantes économies d'énergie. Il n'est pas difficile de montrer que la consommation d'énergie due à la transmission du signal peut être économisée par ordre de grandeur en utilisant un routage à sauts multiples avec une courte distance de chaque saut au lieu d'un routage à saut unique avec une longue distance pour la même destination. Par conséquent, la minimisation de la quantité de données communiquées entre les capteurs et la réduction de la longue distance de transmission en un certain nombre de courtes distances sont des éléments clés pour optimiser l'énergie de communication. [25]

## 2.6 Gestion d'énergie dans RCSF

La gestion de l'énergie consiste à éteindre les composants matériels du capteur qui ne sont pas utilisés. Dans un réseau de capteurs, les protocoles de communication doivent garantir que les périphériques tels que le microprocesseur, la mémoire ou l'émetteur-récepteur radio ne sont alimentés que lorsque cela est nécessaire. Ainsi, d'importantes économies d'énergie sont réalisées en éteignant complètement certaines parties du circuit du capteur lorsqu'il ne reçoit ou ne transmet pas de données, au lieu de maintenir le nœud de capteur en mode inactif. Ce schéma tente simplement de réduire le gaspillage d'énergie dû à l'écoute au repos, c'est-à-dire l'énergie perdue pendant l'écoute pour recevoir un éventuel trafic qui n'est pas envoyé. La désactivation de l'interface de communication lorsqu'elle n'est pas utilisée permet des gains importants car les émetteurs-récepteurs sont souvent les plus gros consommateurs d'énergie du nœud. En conséquence, le cycle d'utilisation du capteur, c'est-à-dire la fraction du temps que le nœud de capteur passe éveillé, est réduit à moins de 1 %, ce qui améliore considérablement la durée de vie du réseau. Les réseaux de capteurs

sans fil sont similaires aux réseaux ad hoc sans fil en termes de topologie de réseau et de routage multi-sauts. Mais les réseaux de capteurs se distinguent également des autres réseaux ad hoc sans fil par le fait qu'ils sont constitués de centaines ou de milliers de nœuds autonomes et que la direction de la plupart du trafic des capteurs va des nœuds vers la station de base. Une autre caractéristique unique des RCSF est que les nœuds de capteurs dans le réseau sont équipés de batteries de capacité limitée et sont censés fonctionner sans interaction humaine pendant une longue période. Par conséquent, la gestion de l'alimentation de chaque nœud de capteurs joue un rôle très important dans l'augmentation de la durée de vie des réseaux de capteurs . [25]

## 2.7 Protocoles de routage

La durée de vie des nœuds de capteurs est la question la plus importante pour les RCSF, car les nœuds de capteurs ont des ressources énergétiques très limitées. Le protocole de routage joue un rôle majeur dans la durée de vie des nœuds de capteurs. Le routage dans les RCSF n'est pas similaire à celui des autres réseaux sans fil en raison de diverses propriétés uniques des nœuds de capteurs, telles que les contraintes énergétiques, les capacités de traitement, la transmission des informations collectées par plusieurs nœuds à une seule station de base, l'improbabilité d'une adresse globale et le déploiement aléatoire des nœuds de capteurs, etc. Afin de tenir compte de ces propriétés, différents types de protocoles de routage ont été développés. Le but ultime de ces protocoles de routage est d'atteindre l'efficacité énergétique et de maximiser la durée de vie globale du réseau. Il existe trois principaux types de protocoles de routage spécifiquement proposés pour les RCSF :

- Plat.
- Basé sur la localisation.
- Hiérarchique.

### 2.7.1 Plat

Dans le protocole de routage plat, chaque nœud joue le même rôle et les nœuds travaillent ensemble pour effectuer la tâche de détection. Les protocoles de routage

plat sont opérationnels dans RCSF qui sont de petite taille et sont assez peu souhaitables dans un déploiement à grande échelle en raison des limitations de ressources. des ressources.

La transmission de données est effectuée saut par saut, en utilisant généralement la forme d'inondation . L'inondation, le comméragage, le protocole SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation) et la diffusion dirigée sont quelques-unes des méthodes de routage. Diffusion dirigée sont quelques-uns des protocoles de routage qui utilisent une structure de réseau plate. [26]

### 2.7.2 Protocole base sur la localisation

Dans le protocole de routage basé sur l'emplacement, les informations sur l'emplacement des réseaux sans fil sont utilisées pour acheminer les données d'une manière économe en énergie. Des dispositifs GPS (Global Positioning System) sont attachés à chaque nœud de capteur pour une localisation précise. Ces informations de localisation sont utilisées pour calculer la distance entre deux nœuds donnés afin d'estimer correctement l'utilisation de l'énergie. La connaissance de la région à détecter par les nœuds améliore la diffusion des requêtes dans cette région spécifique, limitant ainsi le nombre de transmissions dans les zones hors région. de transmission dans l'espace hors-région. Le routage basé sur l'emplacement est idéal pour les réseaux mobiles ad hoc. mobiles. [26]

En résumé, le routage basé sur l'emplacement nécessite trois faits :

- Chaque nœud du réseau doit connaître l'information sur sa propre position .
- Chaque nœud doit être conscient de la position de ses nœuds adjacents, situés à un saut de lui.
- L'emplacement du nœud de destination doit être connu de la source.

### 2.7.3 Protocoles Hiérarchiques

Dans le routage hiérarchique, la zone du réseau est divisée en grappes, et les nœuds de capteurs ayant une énergie plus élevée sont responsables du traitement et de la transmission des informations. Le type hiérarchique de protocoles de routage

fournit les meilleurs résultats en termes d'efficacité énergétique. Sur la base de différents attributs, une taxonomie atypique des protocoles de routage hiérarchique RCSF est présentée à la figure 2.7. La base de presque tous les protocoles de routage hiérarchique à faible consommation d'énergie est LEACH. Les améliorations apportées à LEACH sont réalisées en modifiant la technique de routage, et l'objectif de presque toutes les améliorations est d'optimiser l'utilisation de l'énergie et de maximiser la durée de vie globale du réseau de capteurs. [27]

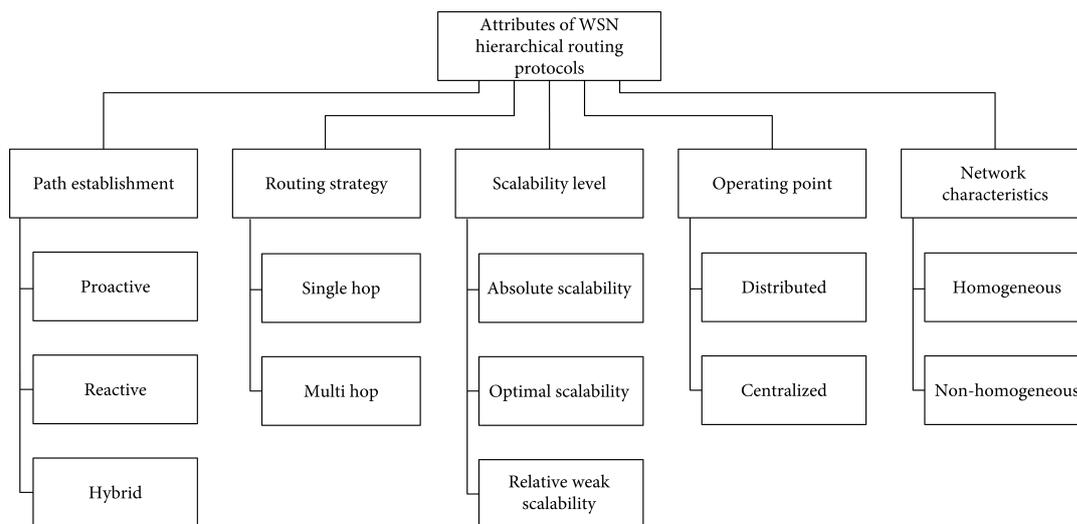


FIGURE 2.7 – Taxonomie des protocoles de routage hiérarchique pour les RCSF. [27]

## Categories

Les algorithmes de routage hiérarchique dans les RCSF ont été étudiés sous différents angles. Une méthode courante est le regroupement en divisant les nœuds de capteurs en groupes. Il s'agit d'une technique de communication de données couramment utilisée pour réduire la consommation d'énergie en envoyant les données des capteurs à la tête de cluster et à la station de base. Dans le clustering hiérarchique, l'ensemble du réseau de capteurs est divisé en différents clusters ou couches multiples. La transmission au sein d'un cluster est coordonnée par chaque tête de cluster qui est également responsable du routage entre les clusters ou les stations de base. Les données voyagent d'un niveau à l'autre, ce qui leur permet de parcourir de plus grandes distances. de plus longues distances. Cela peut rendre la communication des

données plus rapide et plus économe en énergie. Ainsi, la mise en grappe offre avantages de l'agrégation des données entre les têtes de cluster à différents niveaux afin d'améliorer les performances de l'ensemble du RCSF [28].

Les catégories suivantes sont couramment utilisées :

- **Transmission à un seul saut** : Une tête de cluster envoie les données à la station de base directement sans passer par les autres têtes de cluster. Il s'agit de la méthode de transmission la plus simple sans avoir besoin de prendre en compte d'autres informations. Cependant, elle peut ne pas convenir à un réseau à grande échelle car les capteurs sont limités par la distance de transmission et ne sont pas autorisés à transmettre des données en dehors d'une certaine portée. Même si les données peuvent être transmises, cela peut entraîner une lourde charge pour la tête de cluster car la consommation d'énergie est directement proportionnelle à la distance, et elle est plus élevée que celle de la tête de cluster. directement proportionnelle à la distance, et plus élevée pour les longues distances. distances plus longues. [28]
- **Transmission à sauts multiples** : Cluster heads send data to the next cluster head(s) until the base station is reached. Cette méthode permet de diviser une seule longue distance en plusieurs distances plus courtes pour les transmissions. Cela peut partager la charge entre les têtes de cluster, et elle est plus convient mieux aux réseaux à grande échelle. Cependant, une méthode de routage appropriée est nécessaire car l'énergie sera gaspillée pour les transmissions inutiles. l'énergie sera gaspillée pour des transmissions inutiles. Les têtes de cluster qui sont les plus proches de l'évier sont toujours surchargées de trafic lourd, ce qui entraîne leur épuisement rapidement. La mise en grappe avec une taille inégale a été la principale solution étudiée pour traiter ces problèmes. [28]

## 2.8 Comparaion entre les protocoles de routage Hiérarchique

	LEACH	PEGASIS	Layered PEGASIS	TEEN	APTEEN	TTDD
Classification	hierarchical	hierarchical	hierarchical	hierarchical	hierarchical	hierarchical
Proactive	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Energy Conservation	Very Good	Very Good	Very Good	Good	Good	Good
Network Life Time	Good	Very Good	Very Good	Very Good	better	Good
Data-Based	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Data Aggregation	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Location-Based	No	No	No	No	No	Yes
(Qos-Supported	No	No	No	No	No	Yes
Multipath	No	No	No	No	No	No
Optimal Path	No	No	No	No	No	No
Robustness	better	better	better	better	better	Good
Scalability	Good	Good	Good	Good	Good	common
Security	No	No	No	No	No	No

FIGURE 2.8 – Comparaison entre les protocoles hiérarchiques [29].

- **LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)** : Le protocole de routage LEACH est à la base du développement de la plupart des protocoles de routage hiérarchique dans les RCSF. LEACH est un algorithme de routage en grappes auto-organisé et adaptatif. Dans ce protocole, l'ensemble du réseau est divisé en plusieurs grappes. Chaque grappe est composée de plusieurs nœuds de capteurs, un nœud de capteur sera désigné comme CH, et tous les autres nœuds de capteurs existant dans cette grappe deviennent des nœuds membres. Les nœuds membres transfèrent les données au CH, et le CH transmet les données collectées à la station de base après avoir effectué un processus d'agrégation. Les CHs agissent comme un nœud intermédiaire

entre les nœuds membres et la station de base. En raison de leurs tâches supplémentaires, les CHs dissipent plus d'énergie que les nœuds normaux. Comparativement, le protocole de routage hiérarchique LEACH consomme moins d'énergie et améliore la durée de vie globale du réseau que les autres protocoles de routage non hiérarchiques [27].

- **PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems) :** PEGASIS est un protocole de routage en chaîne pour les RCSF. Dans PEGASIS, chaque nœud de capteur doit seulement transmettre des données à son voisin qui est plus proche du nœud "Sink". Plusieurs chaînes peuvent être construites selon l'algorithme gourmand et le leader de chaque chaîne prend la responsabilité de transférer les données vers le nœud récepteur. En raison de la lourde charge des leaders des chaînes, chaque nœud est leader à tour de rôle pour équilibrer la consommation d'énergie. Grâce à la propagation multi-sauts, la communication longue distance entre le nœud de capteur et le nœud récepteur est évitée et une grande partie de l'énergie est économisée [30].
- **TEEN (Threshold sensitive energy Efficient sensor Network protocol) :** Le protocole TEEN utilise un algorithme de clustering similaire au LEACH, mais le TEEN est un protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs sans fil réactifs. Dans le processus d'établissement d'un cluster, le protocole TEEN définit deux seuils, l'un dur et l'autre doux, ce qui réduit la quantité de transmission de données par le biais d'un filtre. Après la sélection de la tête de cluster, en plus d'atteindre les données par le biais de TDMA, deux paramètres de seuil doivent être diffusés. Le seuil dur est le minimum de transmission de données, le seuil doux spécifie la plage de changement des données détectées. Lorsque le nœud surveille les données dépassant le seuil dur la première fois, les nœuds peuvent envoyer des données à la tête de cluster, et définir les données comme nouveau seuil dur et enregistrer la valeur de surveillance "vd"(valeur détectée). Ensuite, seules les données de surveillance sont supérieures au seuil dur et la valeur absolue de la différence avec la vd n'est pas inférieure au seuil souple, les nœuds peuvent envoyer des données et définir les nouvelles données comme nouveau seuil dur. Le protocole réduit considérablement la quantité de transfert de données en fixant un seuil souple

et un seuil dur, ce qui permet de surveiller un certain nombre d'événements inattendus et de points chauds, mais le seuil empêche certaines données, ce qui ne convient pas à l'application de rapports périodiques de données [29].

- **APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)** : Le protocole APTEEN est le protocole d'extension du protocole TEEN, qui ajuste les paramètres émis par la tête de cluster, qui peut changer les paramètres connexes en fonction des besoins des utilisateurs ou de l'utilisation du type, y compris un ensemble d'attributs physiques exprimés ces utilisateurs s'attendent à obtenir seuil dur et souple ; mode de fonctionnement (TDMA) ; temps de comptage (CT), la période de temps la plus représentée transmission de données réussies d'un nœud [29].
- **TTDD (Two-Tier Data Dissemination)** TTDD est un protocole de routage hiérarchique basé sur une grille virtuelle . Chaque nœud source construit de manière proactive une structure de réseau virtuelle basée sur la grille en fonction des données sensorielles existantes et devient lui-même un point de passage de cette grille. Le puits mobile inonde localement une requête où ce paquet de requête sera relayé aux nœuds sources via les points de passage. Les paquets de données générés par le nœud source seront ensuite transmis au récepteur dans la direction opposée au chemin d'origine emprunté par le paquet de requête. Bien que le TTDD réduise la consommation d'énergie globale en limitant le surdébit d'inondation dans une grille locale, le coût de construction de la grille pour chaque nœud source est immense [31]

## 2.9 Conclusion

Les systèmes d'irrigation souffrent d'un grand nombre de problèmes, en particulier les systèmes traditionnels. Nous avons vu que chaque type de système d'irrigation offre certains avantages et souffre d'autres problèmes, d'où la nécessité du RCSF qui peut aider à améliorer ce secteur, Mais le principal défi de cette technologie est de choisir judicieusement le protocole de routage utilisé dans le réseau en fonction des besoins du système. Nous avons vu dans ce chapitre qu'il existe trois principaux types de protocole de routage, mais l'intérêt va pour le type hiérarchique en raison de

sa force en termes de conservation de l'énergie qui est le principal défi dans le RCSF dans le domaine de l'irrigation.

De la comparaison des différents protocoles de routage, nous avons conclu que tous les protocoles ont seulement quelques améliorations et extensions d'un protocole de routage appelé LEACH, où ce protocole est le premier protocole de routage hiérarchique proposé, et qui prouve la flexibilité de ce protocole aux différents changements qui en font un bon choix pour l'utilisation dans les RCSF avec des besoins personnalisés.

## Chapitre 3

# SII : Système d'irrigation intelligent basé sur le RCSF

### 3.1 Introduction

Pour cela, nous allons proposer d'utiliser RCSF afin d'accroître l'efficacité de la production du système, de réduire les coûts et de fournir une base solide aux agriculteurs pour ajuster leurs stratégies à tout moment. Un système d'irrigation intelligent (*SII*) basé sur le RCSF est proposé dans ce chapitre. Ainsi, nous allons présenter l'architecture globale de notre système en expliquant le rôle de chaque composant dans le système. Ensuite, nous allons voir le protocole de routage utilisée dans notre système qui le protocole LEACH et expliquer ce choix.

Enfin, nous présenterons également les principaux critères que notre système doit respecter afin de garantir la QoS. Nous respectons les critères d'énergie et de temps réel en appliquant des formules spécifiques présentées à la fin de ce chapitre.

### 3.2 Irrigation intelligente basée sur RCSF

Il existe de nombreuses conceptions de systèmes d'irrigation qui prennent en compte l'énergie utilisée et la gestion de l'eau. L'énergie utilisée par les pompes et les vannes dépasse souvent l'énergie utilisée pour toutes les plantes et il faudra donc choisir une pompe ayant la plus grande efficacité possible pour réduire la consommation d'énergie. La nouvelle gestion de l'eau se concentre sur l'utilisation d'un contrôle intelligent des vannes et des pompes pendant l'irrigation pour les demandes

concurrentes d'eau et cherche à allouer l'eau sur une base équitable pour satisfaire toutes les utilisations et demandes. Les systèmes intelligents utilisés pour atteindre la robustesse, la traçabilité et fournir une solution à faible coût avec une tolérance d'imprécision, de vérité partielle, d'incertitude et d'approximation. Alors pour réaliser correctement un système d'irrigation, il est nécessaire de trouver le bon protocole de routage qui permet de respecter des certains critères qui permettent d'assurer certains services importants dans notre système. [32]

### 3.2.1 Exigence d'utilisation RCSF dans l'irrigation

L'irrigation de surface consomme une quantité d'eau importante par rapport aux autres systèmes d'irrigation. En outre, il s'agit d'une technique En outre, il s'agit d'une technique peu efficace qui nécessite toujours un terrain plat ou un nivellement.

L'irrigation par aspersion consomme également plus d'eau que l'irrigation goutte à goutte. En outre, cette technique peut être affectée par les conditions météorologiques (par exemple, le vent peut affecter les schémas d'humidification) et peut favoriser le développement de maladies des plantes. Si l'irrigation au goutte-à-goutte présente un certain nombre de caractéristiques par rapport aux autres systèmes d'irrigation, comme une importante économie d'eau la possibilité d'automatisation, et la limitation de l'érosion du sol. [33] Ainsi, tous ces systèmes traditionnels souffrent d'énormes problèmes, ce qui nous amène à l'utilisation de RCSF car :

L'utilisation de la technologie RCSF pour contrôler et gérer les systèmes d'irrigation est une solution idéale pour garantir une utilisation efficace et rationnelle de l'eau et contribuer ainsi à réduire la gravité de la crise mondiale de l'eau. [34]

## 3.3 Architecture du Système

La figure 3.1 montre l'architecture de notre système où nous pouvons voir que les nœuds sont placés dans une large gamme de la ferme afin de capturer plus d'informations sur l'état de la plante et l'envoyer à un nœud spécifique appelé "Sink" en utilisant un protocole de routage spécifique qui organise la communication des nœuds et le comportement de transmission, le nœud "Sink" est responsable de la collecte de

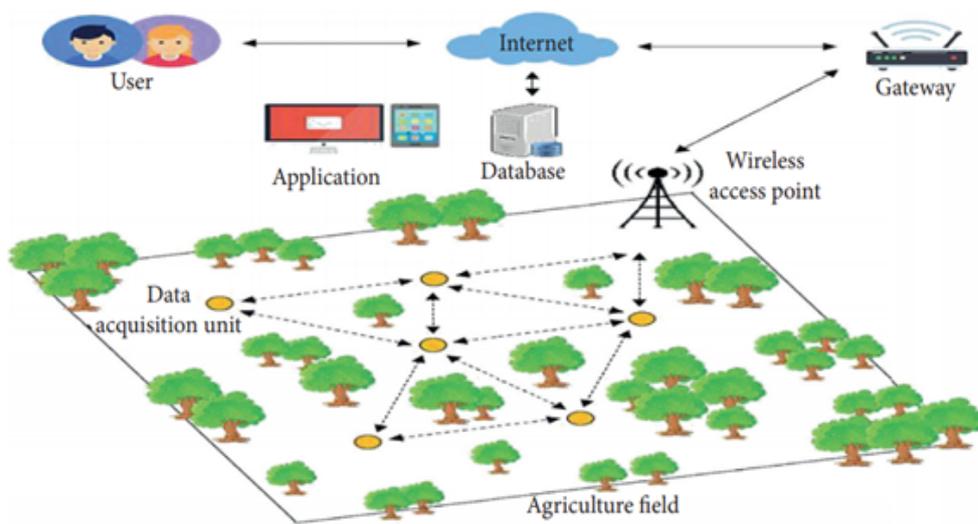


FIGURE 3.1 – Architecture de communication de RCSF pour le SII

toutes les données capturées par les nœuds et l'envoyer à l'unité de traitement qui peut être en dehors de la ferme ou il pourrait être près de la ferme où la communication entre le puits et cette unité sera via Internet. l'unité de traitement traitera les données reçues et identifiera l'état des plantes pour prendre la décision ou envoyer des alertes à l'agriculteur via une application qui l'aidera à suivre l'état de sa ferme et de ses plantes.

## 3.4 Composants du système

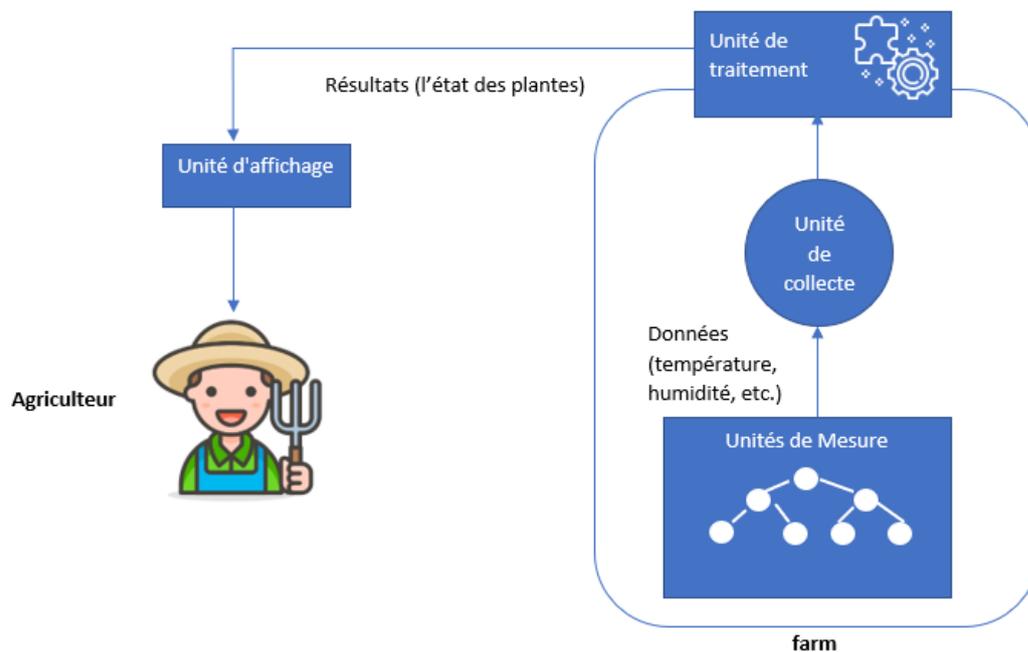


FIGURE 3.2 – Composants du système proposé

La figure 3.2 représente les différentes composantes du système proposé tel que :

### 3.4.1 Unités de mesure

Ces unités forment notre réseau de capteurs sans fil, elles sont interconnectées et communiquent en utilisant un protocole de routage spécifique qui définit comment les nœuds se interconnectent et communiquent. Le seul travail de ces unités est d'observer et de collecter des données en continu sur l'état de la plante (température, niveau d'eau, etc.), puis les envoyer à une unité spéciale appelée le nœud récepteur.

#### Remarque

Tous les capteurs envoient le même type de données au nœud de collecte. Ces données sont constituées de différentes informations sur l'état de santé de la plante (température, humidité, sol) recueillies par de nombreuses unités de détection dans le même nœud.

### 3.4.2 Unité de collecte de données

On appelle aussi "Sink node", Cete unite un une noeud spécifique dans le réseau reçoit toutes les données transmises dans le même ordre et les envoie à l'unité de traitement.

Le nœud collecteur est une unité qui collecte et reçoit toutes les données transmises dans le même ordre et les envoie à l'unité de traitement.

### 3.4.3 Unité de traitement

Cette unité sera située en dehors de la zone agricole, cette unité peut être dans le Cloud et connectée au RCSF via Internet ou elle peut être un serveur local, nous pouvons définir l'unité de traitement comme l'unité principale de notre système, où nous trouvons tout le traitement des données qui se passe ici. Ce module reçoit les données de tous les capteurs du réseau, et les analyse pour déterminer l'état des plantes, si elles ont besoin d'eau ou non.

### 3.4.4 Unité d'affichage

Le rôle de cette unité est d'afficher le résultat obtenu à partir de l'unité précédente d'une manière simple et agréable que l'utilisateur peut comprendre très bien par l'utilisateur (agriculteur dans notre cas).

## 3.5 Choix de Protocole de routage

De la section précédente, nous pouvons voir que le protocole de routage est le point le plus important dans notre système car il définit les comportements des nœuds câblés et comment ils communiquent, et s'assure que les données seront envoyées dans l'ordre logique au nœud récepteur.

Dans le domaine de l'irrigation, nos intérêts sont principalement de choisir le meilleur protocole pour préserver la consommation d'énergie, aussi le temps de retard doit être raisonnable. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser le protocole de routage LEACH car :

Selon [35], LEACH a attiré beaucoup d'attention en raison de son efficacité énergétique, de sa simplicité et de ses propriétés d'équilibrage de charge. LEACH combine le routage par grappes et les techniques de la couche MAC avec l'agrégation de données spécifiques à l'application pour prolonger la durée de vie du réseau. Dans le système LEACH, le rôle de chef de grappe fait l'objet d'une rotation entre les nœuds afin d'éviter qu'un seul nœud ne consomme de l'énergie. L'idée de LEACH est de diviser le fonctionnement du système en intervalles fixes appelés tours, comme le montre la figure 3.3, avec deux phases dans chaque tour : la phase d'installation et la phase d'état stable. Un tour est défini comme la période entre une instance de la phase de mise en grappe et la sélection de la tête de grappe suivante. Le nombre de tours dans LEACH est déterminé par  $N/K$ , où  $N$  est le nombre de nœuds et  $K$  le nombre prévu de clusters.

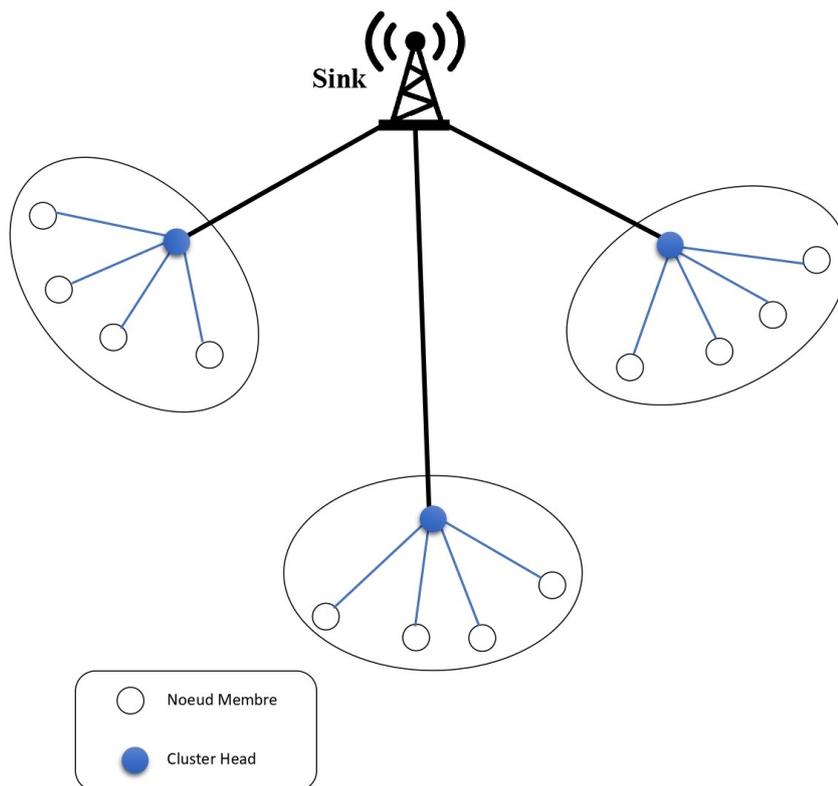


FIGURE 3.3 – Protocole LEACH

Le protocole LEACH est le meilleur choix car :

- Le protocole LEACH est plus économique en faisant tourner le rôle de tête de cluster entre les nœuds à chaque tour, et un choix approprié pour les petites et

- moyennes zones [36]. Cependant, LEACH n'impose aucune contrainte sur la consommation d'énergie, donc les nœuds continuent à transmettre des messages jusqu'à ce que leur énergie soit complètement épuisée.
- LEACH est approprié pour les systèmes homogènes [37] qui est notre cas d'étude, car tous les nœuds transmettent le même type de données (température, humidité, sol). Cependant, il n'y a aucune garantie de respecter le délai de transmission des messages qui est nécessaire pour le système d'irrigation.
  - Pour réduire la somme globale des transmissions d'informations, des techniques de compression locale sont utilisées dans le CH. [37]
  - Le rôle de CH est pivoté et aléatoire pour distribuer les prérequis énergétiques entre les nœuds du système.. [37]

### 3.6 Processus du système d'irrigation

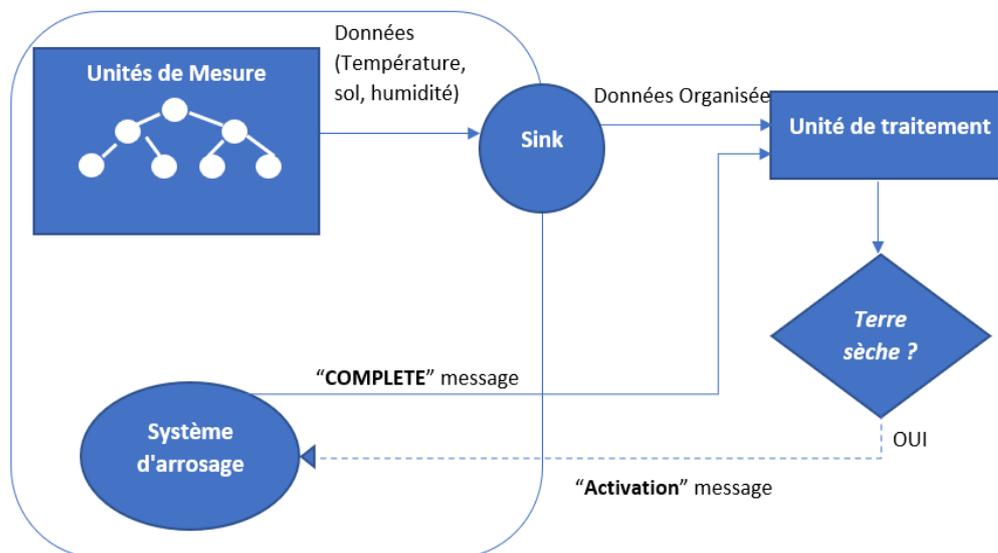


FIGURE 3.4 – Cycle de vie de notre système d'irrigation intelligent.

La figure 3.6 montre comment notre système d'irrigation fonctionne et dans quelles conditions notre système commencera à arroser les plantes.

Tout d'abord, les nœuds de capteurs envoient des informations sur l'état de la plante et du sol (température, humidité, sol) à l'unité de traitement qui va analyser ces données pour calculer le taux de sécheresse.

Ensuite, l'unité de traitement activera le système d'arrosage pour irriguer les plantes si les résultats d'analyse indiquent que le sol est sec :

- Si le niveau d'assèchement du sol atteint un certain seuil, il envoie un message "ACTIVATION" avec une minuterie à l'unité d'arrosage la plus proche en fonction de l'emplacement de la plante afin d'irriguer la plante avec la quantité d'eau appropriée. Lorsque la minuterie s'arrête, l'unité d'arrosage arrête d'irriguer la plante et envoie le message "COMPLETE" à l'unité de traitement.
- Sinon, le système continuera à analyser les autres plantes.

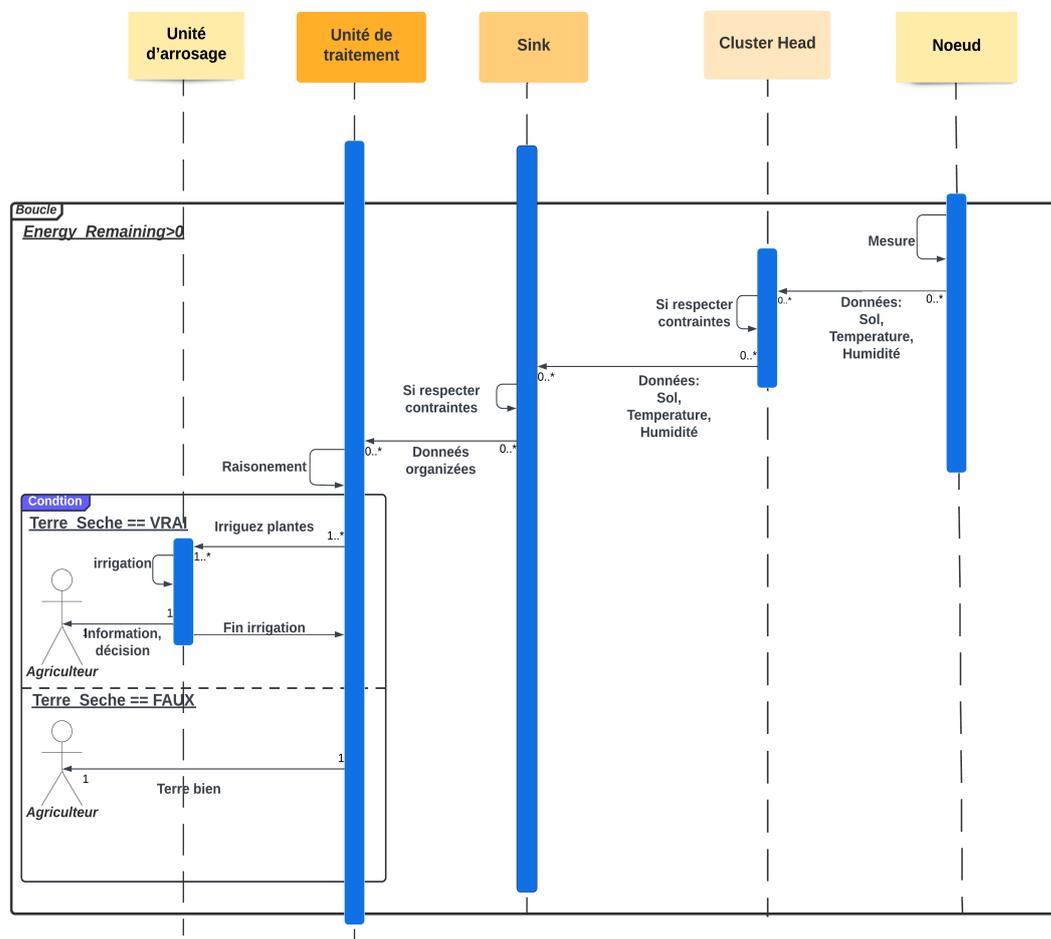


FIGURE 3.5 – Diagramme de séquence de notre système d'irrigation intelligent (SII)

## 3.7 Contraintes des RCSF en termes de temps et d'énergie

Dans cette section, nous donnons des représentations mathématiques pour le modèle de système RCSF et sa faisabilité en temps et en énergie.

### 3.7.1 Modèle de système

Nous considérons un RCSF qui consiste en un ensemble de nœuds de capteurs communiquant par des interfaces radio, ces nœuds de capteurs étant alimentés par des batteries rechargeables via une technologie de récolte d'énergie. Dans un RCSF, chaque nœud de capteur est responsable d'un ensemble d'événements, qui sont représentés par des tâches, et chaque tâche peut consister en une transmission périodique de messages.

On suppose que  $P_{tx}$  fait référence à la consommation d'énergie en mode de transmission,  $P_{rx}$  se réfère à la consommation d'énergie en mode réception. Et  $T_{tx}$  fait référence au temps de transmission,  $T_{rx}$  au temps de réception.

On suppose que  $\mathcal{M}$  sont les messages planifiés à transmettre,  $\mathcal{M}_s^j$  les messages transmis sur un canal  $c_j$ . Nous utilisons  $m_i$  pour désigner le nouveau message arrivé, tel que  $m_i \in \mathcal{M}, i = 1..|\mathcal{M}|$  où son ajout est soumis à la satisfaction de contraintes de temps et d'énergie. Dans notre système,  $m_i$  a les caractéristiques suivantes :

- $r_i$  comme temps de d'arrivée du message ;
- $T_i$  comme la période de message, qui est l'intervalle de temps entre deux arrivées consécutives de messages.
- $D_i$  comme deadline intervalle de temps des messages, ce qui signifie que la transmission des messages doit être effectuée pendant cet intervalle de temps ;
- $WCTT_{i,j}$  comme le temps de transmission du message dans le pire des cas (WCTT) qui se réfère au WCTT de  $m_i$  sur le canal  $c_j$ . Le WCTT est défini comme le rapport entre la taille du message et la vitesse de transmission du canal, c'est-à-dire :  $\frac{|m_i|}{B}$  ;

### 3.7.2 Contrainte du temps

La faisabilité temporelle du système est vérifiée tant que les contraintes de temps réel sont respectées. Ainsi, nous considérons la méthode earliest deadline first (EDF) pour vérifier la faisabilité temporelle du système car elle est basée sur des conditions d'ordonnancement suffisantes et nécessaires, c'est-à-dire que les messages en temps réel sont servis de manière à garantir leur WCTT (voir [38]). L'algorithme de base d'EDF est décrit dans [39], qui peut être utilisé pour l'ordonnancement en temps réel des messages sur un canal donné, la période du message étant égale à sa date limite, c'est-à-dire  $T_i = D_i$ . Pour assurer tous les délais de transmission des messages sur le canal  $c_j$ . Chaque canal a une capacité d'utilisation limitée qui ne doit être dépassée par aucun trafic en temps réel, et qui est égale à 1 (c'est-à-dire 100% de l'utilisation du canal).

Par la suite, la faisabilité du système est vérifiée à temps pour envoyer  $\mathcal{M}_s^j$  sur  $c_j$  si la transmission de  $\mathcal{M}_s$  respecte les deadlines des messages dans chaque période. Les messages sont ordonnancés à l'aide de l'algorithme EDF, Par conséquent, sa description définie dans [39] peut être utilisée pour modéliser l'utilisation du canal de la manière suivante :

$$U_j = \sum_{i=1}^{|\mathcal{M}_s^j|} \frac{WCTT_{i,j}}{T_i} \leq 1 \quad (3.1)$$

### 3.7.3 Contrainte de l'énergie

Nous supposons que chaque nœud de capteurs dispose d'une batterie pour stocker de l'énergie, et qu'il peut également récolter de l'énergie. Ainsi, le respect de l'énergie des nœuds de capteurs est devenu une contrainte stricte . Par conséquent, nous disons que le système est faisable en énergie si et seulement s'il respecte les contraintes énergétiques [40]. La violation de l'énergie est définie lorsque l'énergie consommée dépasse l'énergie disponible ou l'énergie restante.

#### Collecte de l'énergie

Nous considérons l'énergie solaire comme l'énergie récoltée par les nœuds et elle est notée par  $E_H$  et est collectée à l'aide d'un générateur photovoltaïque (PV).

La puissance de sortie du générateur PV à un moment donné  $t$  est donnée par  $P_{PV}(t)$ . According to [41],  $P_{PV}(t)$  est calculé par

$$P_{PV}(t) = \eta(t) \times N \times A \times G \quad (3.2)$$

Où  $\eta(t)$  est la sortie instantanée du générateur photovoltaïque à  $t$ ,  $N$  est le nombre de modules du générateur photovoltaïque,  $A$  est la surface d'un module unique utilisé dans le système (elle est mesurée en  $m^2$ ),  $G$  est la mesure de l'irradiation globale incidente du plan titré en  $W/m^2$ .

Let  $E_H([t_1, t_2])$  soit l'énergie totale produite par le générateur photovoltaïque pendant l'intervalle de temps  $[t_1, t_2]$ , où  $t_2$  et  $t_1$  sont des unités de temps entières. Par la suite, on suppose que l'énergie est récoltée uniformément pendant cet intervalle de temps, et selon [42]  $E_H([t_1, t_2])$  sera

$$E_H([t_1, t_2]) = \int_{t=t_1}^{t_2} P_{PV}(t) dt \quad (3.3)$$

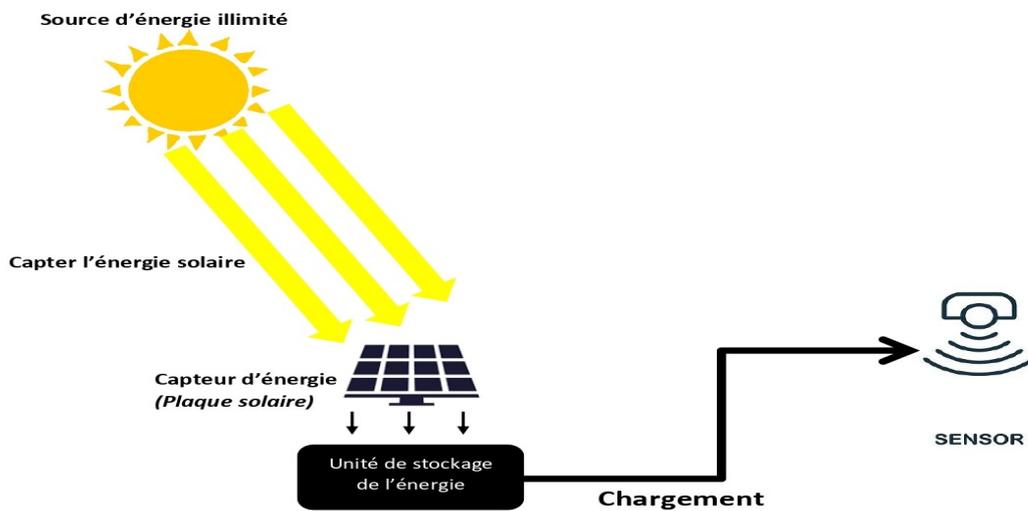


FIGURE 3.6 – Utilisation de l'énergie solaire dans RCSF

### Stockage de l'énergie

Le nœud de capteurs fonctionne généralement avec une unité de stockage, à savoir une batterie, dont la capacité est exprimée en unités d'énergie. Let  $C_B(t)$  soit

la capacité restante de la batterie au moment  $t$ . Soit, l'énergie consommée par les messages à venir après  $t$  peut dépasser l'énergie restante  $C_B(t)$ . Ainsi, si la capacité restante  $C_B(t) \approx 0$  alors la batterie sera considérée comme complètement déchargée.

### Consommation d'énergie

Selon [43], nous supposons que l'énergie la plus consommée par un nœud de capteur est pendant son mode de communication. Par conséquent, dans cette section, nous nous concentrons sur l'énergie consommée en mode communication. Le nœud de capteur peut alors se trouver dans les trois modes suivants : transmission, réception et mode inactif. (see [44]), de sorte que son énergie consommée en communication est égale à l'énergie consommée par son circuit radio dans ces trois modes.

Nous notons que pour les transmissions de messages, le circuit radio du nœud passe d'abord en mode inactif pour chaque mode de transmission. Par conséquent, nous notons  $E_j$  comme l'énergie consommée pour la transmission d'un seul message sur  $c_j$  comme suit :

$$E_j = P_{tx}T_{tx} + P_{idle}T_{idle} \quad (3.4)$$

Le WCTT d'un message est défini en fonction du temps de transmission de ce même message.  $T_{tx}$ , où WCTT est égal à  $T_{tx}$  pour la transmission du message sur un seul canal.

$$E_j([t_1, t_2]) = \sum_{i=1}^{|\mathcal{M}_s^j|} (P_{tx}WCTT_{i,j} + P_{idle}T_{idle}) \left[ \frac{t_2 - t_1}{T_i} \right] \quad (3.5)$$

On note que sur l'intervalle  $[t_1, t_2]$  les valeurs de  $P_{tx}$ ,  $P_{idle}$ , et  $T_{idle}$  sont constantes. a Alors, Eq. 3.5 peut être simplifié en utilisant Eq. 3.1 et en remplaçant  $P_{tx}$ ,  $P_{idle}$ , et  $T_{idle}$  avec deux constantes désignées par  $C_1$  et  $C_2$  comme suit :

$$E_j([t_1, t_2]) = U_j P_{tx} (t_2 - t_1) + \sum_{i=1}^{|\mathcal{M}_s^j|} \frac{1}{T_i} P_{idle} T_{idle} (t_2 - t_1) \quad (3.6)$$

$$= U_j C_1 + \sum_{i=1}^{|\mathcal{M}_s^j|} \frac{1}{T_i} C_2 \quad (3.7)$$

La faisabilité du système en énergie est vérifiée durant l'intervalle de temps  $[t_1, t_2]$  si

$$\sum_{j=1}^{|\mathcal{C}|} E_j([t_1, t_2]) < C_B(t_1) + E_H([t_1, t_2]) \quad (3.8)$$

### 3.7.4 Fonctionnement d'Opt-LEACH

Parce que les messages sont le seul moyen de communiquer entre les nœuds, nous allons essayer de modifier le protocole LEACH original dans notre système afin de le faire respecter les métriques de l'énergie et du temps à l'intérieur des nœuds où, avant d'envoyer un message, le nœud doit vérifier la faisabilité du réseau en temps et en énergie, c'est-à-dire les contraintes de temps réel et les contraintes d'énergie.

## 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept et la conception de notre système en introduisant l'architecture du système et en discutant les principaux composants de ce système. Nous avons également expliqué les raisons pour lesquelles nous avons choisi d'utiliser LEACH comme protocole de routage et les critères et avantages que ce protocole offrira à notre système.

Ensuite, nous avons présenté le processus de notre système d'irrigation qui présente dans quelles conditions notre système va commencer à irriguer les planètes.

À la fin, nous avons vu les principaux critères auxquels le système proposé SII doit respecter afin d'être un système faisable.

## Chapitre 4

# Implémentation et résultats

### 4.1 Introduction

La simulation de réseaux permettent d'imiter les communications du monde réel, permettant ainsi un développeur de découvrir les limites potentielles, problèmes, concevoir des erreurs et corrigez-les.

Pour cela nous avons dans ce chapitre de simuler un RCSF qui utilise LEACH comme protocole de routage et nous avons amélioré ce protocole pour respecter les contraintes du temps et énergie pour garantir les QoS, puis comparer les résultats obtenus de cette amélioration avec le protocole LEACH originale pour trouver les avantages de cette amélioration.

### 4.2 Les outils utilisés

#### 4.2.1 OMNeT++ –version 5.2.1–

OMNeT++ est une bibliothèque et un Framework de simulation C++ extensible, modulaire et basé sur des composants, principalement pour la construction de simulateurs de réseau. « Réseau » est entendu dans un sens plus large qui inclut les réseaux de communication câblés et sans fil, les réseaux sur puce, les réseaux de file d'attente, etc. Les fonctionnalités spécifiques à un domaine telles que la prise en charge des réseaux de capteurs, des réseaux ad hoc sans fil, des protocoles Internet, de la modélisation des performances, des réseaux photoniques, etc., sont fournies par des cadres modèles, développés en tant que projets indépendants. OMNeT++ offre un IDE basé sur Eclipse, un environnement d'exécution graphique et une foule d'autres

outils. Il offre des extensions pour la simulation en temps réel, l'émulation de réseau, l'intégration de base de données, l'intégration SystemC et plusieurs autres fonctions. OMNeT++ est distribué sous licence publique académique. [45]

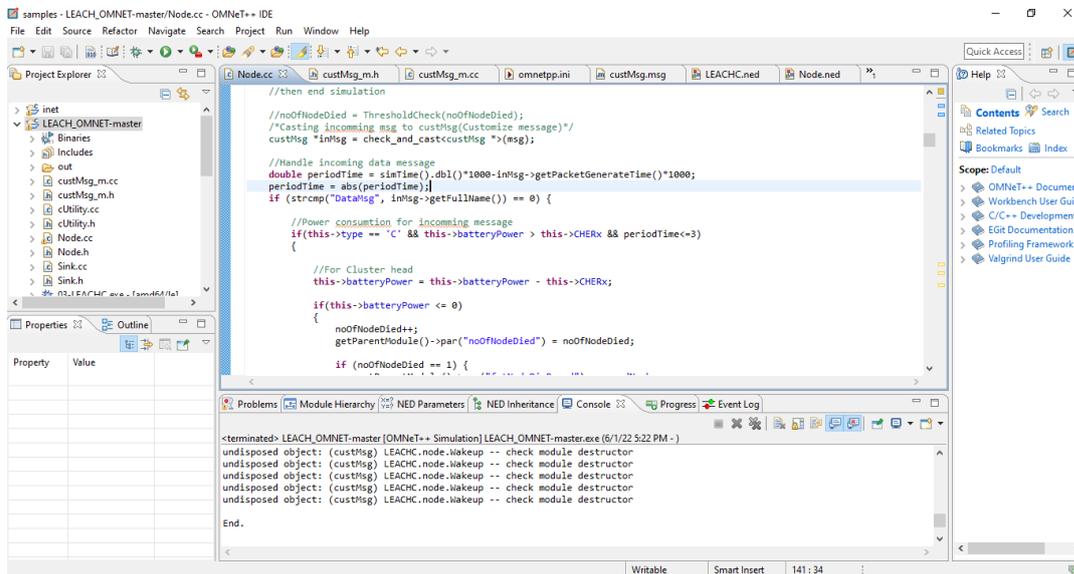


FIGURE 4.1 – OMNeT++

## 4.3 Implémentation

Après avoir obtenu le protocole LEACH original [46], nous l'avons modifié et optimisé pour qu'il respecte nos critères définis qui sont :

- Notre protocole doit respecter le critère de transmission en temps réel avant l'envoi de tout message.
- Notre protocole doit respecter le critère d'énergie avant l'envoi des messages et depuis la réception des messages.

### 4.3.1 Comportement du protocole de routage opt\_LEACH

Dans cette section, nous allons présenter les principales différences et optimisations que nous avons ajoutées au protocole LEACH original afin de parvenir à notre version opt\_LEACH.

### Transmission du messages

---

#### Algorithme 1 : Procédure de transmission du messages

---

```

1 if remain_Energy > send_Cost then
2   | message ← new_Message("Data",this.id,current_Time);
   |   sendData(message,this.Cluster_Id);
   |   remain_Energy ← remain_Energy - send_Cost;
3 else
4   | do
5     |   E_Harvesting ← Charging;
6   |   while E_Harvesting > cost_Send;
7   |   message ← new_Message("Data",this.id,current_Time);
   |   sendData(message,this.Cluster_Id);
   |   remain_Energy ← remain_Energy - send_Cost
8 end

```

---

Cet algorithme 1 représente le processus d'envoi de données d'un nœud vers un CH ou d'un CH vers le Sink où, pour envoyer un message, le nœud doit avoir au moins assez d'énergie pour pouvoir envoyer le message. en d'autres termes, l'énergie restante est supérieure à l'énergie du coût d'envoi.

### Recevoir du messages

---

#### Algorithme 2 : Procédure de recevoir messages par CH

---

```

1 if current_Time - msg.send_Time ≤ delay_Time then
2   | print("Recieved Successfully")
   |   remain_Energy ← remain_Energy - receive_Cost
3 else
4   | print("Message does not respect QoS")
5 end

```

---

Cet algorithme 2 représente le processus de réception des données par le CH où, afin d'accepter tout message provenant des nœuds, le chef de cluster vérifie si le temps de transmission est supérieur au temps de retard ou non. Le temps de retard est le temps moyen que les messages doivent être envoyés du nœud au CH. La condition

d'énergie est également appliquée ici où la CH ne peut pas recevoir de données si elle a une faible énergie (énergie restante < coût de réception des données).

### Remarque

en supposant que le Sink est une unité puissante qui n'est pas soumise à la contrainte d'énergie.

### 4.3.2 Visualisation du RCSF

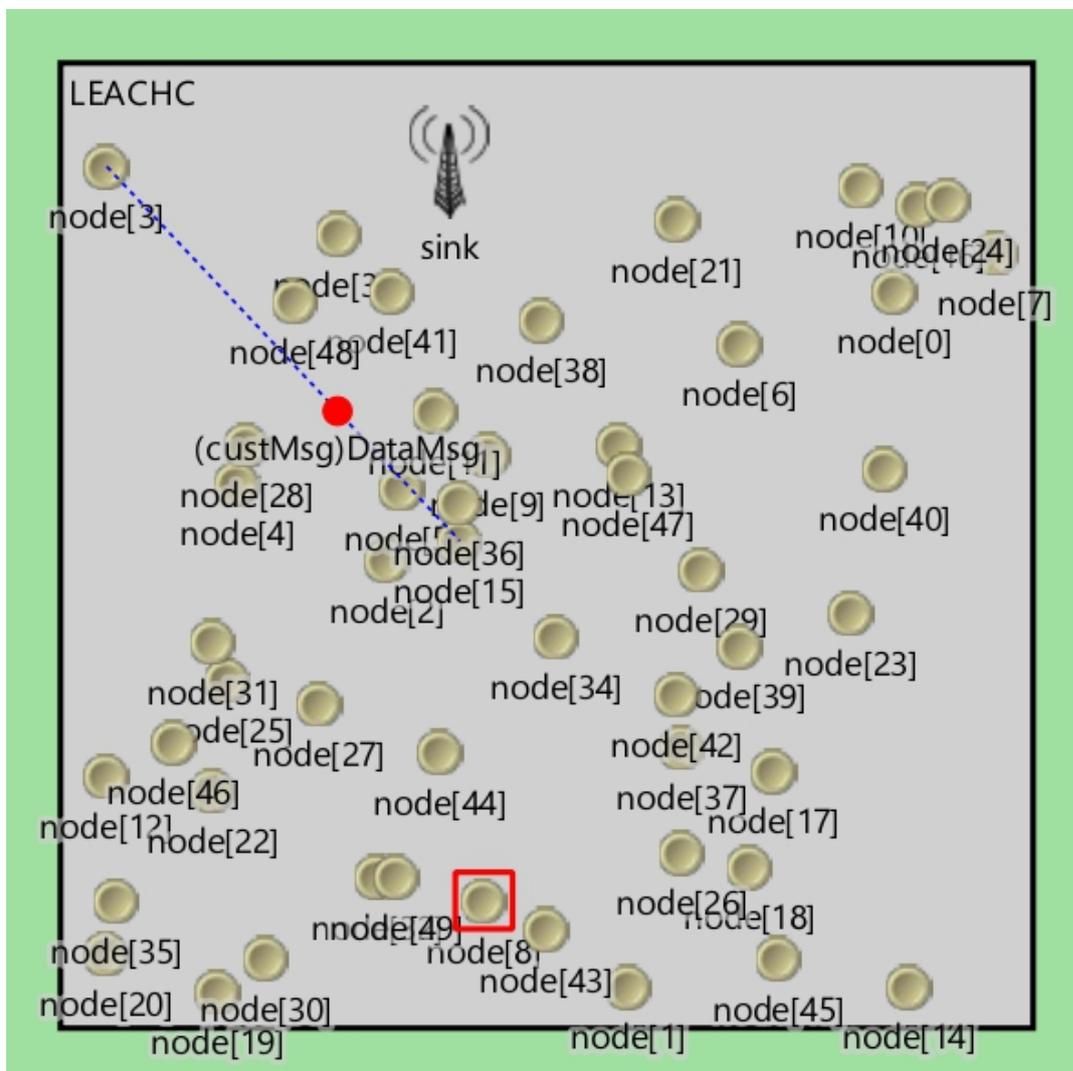


FIGURE 4.2 – Visualisation RCSF

La figure 4.2 représente comment les noeuds sont placés dans le réseau dans une zone de 200 M sur 200 M. Dans ce réseau on a trois types de noeuds :

- **Sink** : Ce noeud collecte les données envoyées par les cluster heads puis les retransmet à l'utilisateur final.
- **Cluster Head** : Ce noeud joue le rôle de Sink mais dans sa zone locale avec des noeuds de cette zone. La sélection de ce noeud est effectuée par un algorithme d'élection qui permet de trouver le noeud qui a la capacité de batterie maximale. Ce noeud collecte les messages envoyés par les noeuds de son cluster. Une fois qu'il reçoit les messages, il les stocke dans sa file d'attente pour les envoyer ensuite à Sink.
- **Member Noeud** : Ce noeud reconnaît son Cluster Head (CH) au début de chaque tour. Où il n'a qu'à transmettre les messages à son CH. Chaque Member Noeud a une capacité énergétique limitée en tant que batterie et pour chaque message transmis l'énergie est réduite d'un coût prédéfini.

### 4.3.3 Structure de message

msg_Id	sender_Id	receiver_Id	start_Time	receive_Time
Content				

FIGURE 4.3 – Structure de message opt\_LEACH

La figure 4.3 représente la structure de notre message LEACH qui contient :

- **Message Id** : L'identificateur de message.
- **Sender Id** : L'identificateur du noeud expéditeur.
- **Receiver Id** : L'identificateur de noeud receveur.
- **Start Time** : Le temps d'envoyer le message.
- **Receive\_Time** : Le temps de recevoir le message.
- **Content** : Le contenu de message qui contient les informations sur les plantes mesurées par les capteurs.

### 4.3.4 Paramètres utilisés

Le tableau suivant 4.1 présente les paramètres utilisés pour la simulation du protocole LEACH dans le simulateur OMNeT++ :

Paramètre	Valeur
Taille du réseau	200 X 200 Metres
Nombre des noeuds	50
Capacite Batterie	500 mAh
Nombre des Tours	250tours
Cout d'envoi message	0.275mAh
Cout de reception message	0.275mAh
Taille de l'entete du message	38 bytes
Temps de transmission à CH	80ms
Temps de transmission à Sink	50ms

TABLE 4.1 – Paramètres utilisés

## 4.4 Résultats obtenus

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus lors de la simulation de notre protocole de routage optimisé **Opt-LEACH** qui respecte la QoS, et nous comparons ces résultats avec ceux du protocole LEACH original.

### 4.4.1 Consommation d'énergie



FIGURE 4.4 – Consommation d'énergie

La figure 4.4 Montre la consommation d'énergie générale des réseaux pendant les tours où nous pouvons voir que les deux versions ont la même consommation d'énergie avec une légère différence aux derniers tours où notre protocole LEACH optimisé Opt-LEACH consomme moins d'énergie aux derniers tours par rapport au LEACH original.

#### 4.4.2 Nombre de nœuds morts

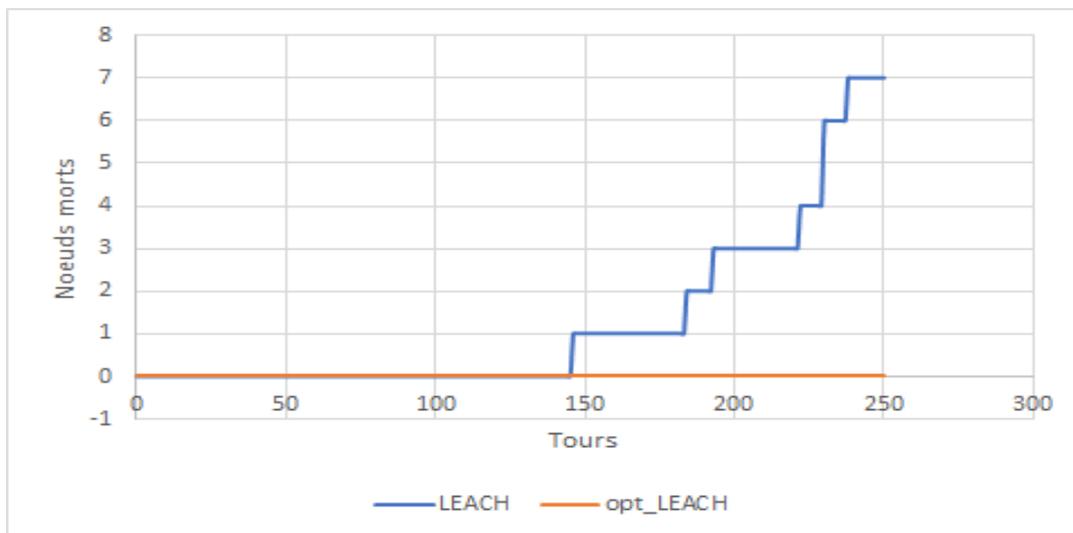


FIGURE 4.5 – Nombre de nœuds morts après l'application de LEACH vs Opt-LEACH

La figure 4.5 Montre le nombre de nœuds morts par tour où nous pouvons voir que pour les 150 premiers tours il n'y a pas de nœuds morts mais à partir du tour 151 les nœuds commencent à mourir tour après tour dans la version originale jusqu'à atteindre 12 nœuds morts au dernier tour, Cependant notre protocole proposé n'enregistre toujours pas de nœuds morts grâce à la formule proposée dans Chap.3/Sec. 3.6.3 Faisabilité énergétique.

Aussi la Faisabilité du temps proposé dans notre protocole permet d'éliminer les messages qui prennent beaucoup de temps en transmission alors il économisera l'énergie nécessaire à la transmission de ces messages gaspillés.

### 4.4.3 Throughput

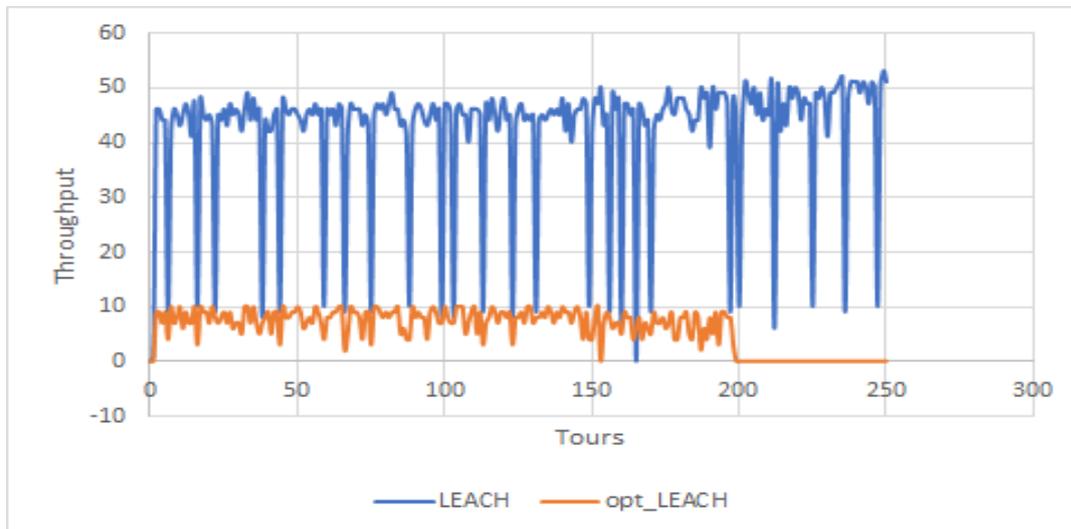


FIGURE 4.6 – Taux de livraison des messages sur un canal de communication

Un autre facteur important dans le réseau que nous devons évaluer est le débit, que nous pouvons définir comme le taux de transmission des messages sur un canal de communication, et dans notre cas, le débit sera le nombre de messages qui sont arrivés avec succès au nœud récepteur.

On peut voir dans le 4.6 que le débit de la version optimisée est toujours plus bas que le protocole original pendant les tours et cela est causé par le critère de délai où le sink n'accepte que les messages qui ont un délai raisonnable (inférieur au seuil - voir paramètres). Le critère d'énergie peut avoir un effet minimal sur ces résultats parce que les nœuds qui ont assez d'énergie pour rester en vie après la transmission du message ne pourraient pas envoyer les données et cela minimiserait le taux de débit. De même, le débit en LEACH est élevé car l'envoi et la réception des données ne respectent aucune contrainte.

#### Remarque

Au cours des 50 derniers tours, le débit est égal à 0, car de nombreux nœuds ont consommé toute leur énergie et il ne reste rien pour envoyer des messages supplémentaires, sans énergie rechargeable, tandis que la contrainte de temps ne permettra

pas d'envoyer les messages restants.

#### 4.4.4 Messages au niveau de "Sink"



FIGURE 4.7 – Nombre de messages reçues par Sink

La figure 4.7 représente le nombre total de messages au niveau du Sink (anciennes messages au niveau du Sink + messages envoyés au "Sink" au cours du tour actuel) pour chaque tour.

Parce que le taux de débit est plus faible dans la version optimisée comme nous l'avons vu dans la section précédente, il y aura donc une pénurie dans le nombre de messages au "Sink" causée par le critère des conditions de temps de retard et cela est présenté dans cette courbe où les données au "Sink" sont beaucoup plus faibles dans notre version optimisée par rapport au protocole LEACH original.

#### 4.4.5 Nombre des Clusters

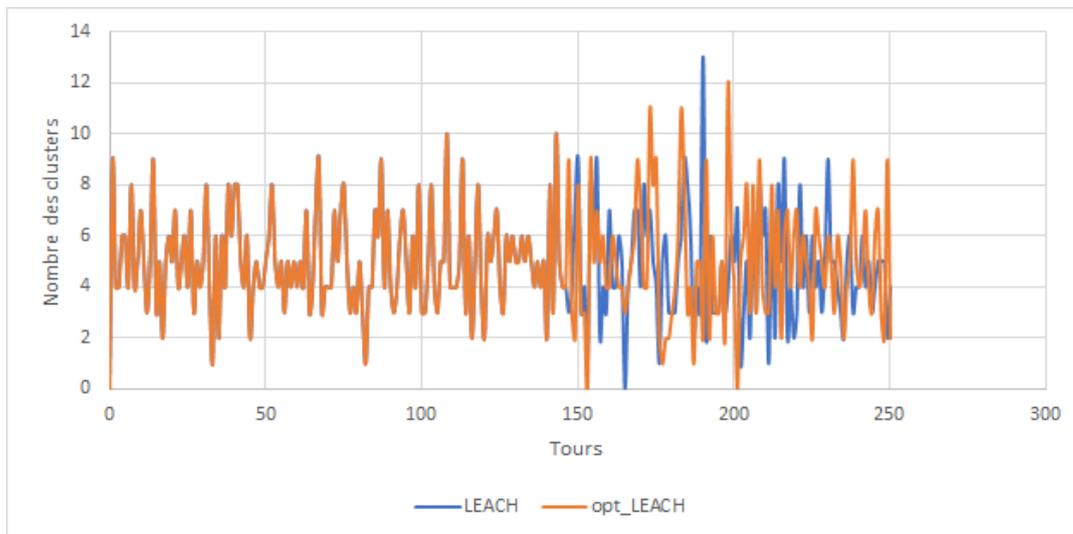


FIGURE 4.8 – Nombre des clusters

La figure 4.8 représente le nombre de clusters formés pendant les tours où nous pouvons voir que pour les 150 premiers tours le nombre de clusters est le même pour les deux versions, mais après cela nous pouvons voir que le nombre de clusters est différent pour chaque version car à partir de l'étape 150 les nœuds commencent à mourir dans le protocole LEACH original ce qui affecte la formation des clusters.

### 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le simulateur OMNET++ pour l'implémentation du protocole de routage LEACH avec quelques modifications de son comportement pour respecter les contraintes de temps et d'énergie afin d'assurer la QoS du réseau.

Nous avons évalué le protocole de routage LEACH avec la version améliorée Opt-LEACH en termes de : Nombre de de nœuds morts, Débit, Nombre de messages reçus par Sink, et Nombre de clusters.

Il a été constaté que la nouvelle version LEACH (Opt-LEACH) répond aux contraintes de temps et d'énergie avant d'envoyer des messages qui conduisent à réduire la

consommation d'énergie et d'améliorer QoS. Ce résultat réduit le nombre de nœuds morts dans le réseau.

## Conclusion Générale

Durant cette dernière décennie, Les réseaux de capteurs sont devenus un sujet de discussion de nombreuses communautés scientifiques. L'objectif principal des réseaux de capteurs est la collecte, le traitement et la transmission d'un ensemble de grandeurs physiques de l'environnement dans lequel ils se trouvent. Ces opérations sont gourmandes en termes de consommation d'énergie, qui constitue un facteur crucial pour la durée de vie des capteurs et par conséquent du réseau. L'énergie est une ressource critique et constitue souvent un obstacle majeur au déploiement des réseaux de capteurs. C'est pour cela que la communauté scientifique s'est orientée vers l'amélioration des protocoles de communication pour les réseaux de capteurs sans fil afin de prolonger leurs durées de vie.

Dans cette thèse, nous avons vu les différents types de systèmes d'irrigation avec les avantages de chacun d'entre eux, nous avons également vu les différents types de protocoles de routage utilisés par les RCSF, où nous avons vu que les protocoles hiérarchiques ont un avantage en termes de conservation de l'énergie, à côté de cela, nous avons vu la différence entre les protocoles hiérarchiques où nous avons vu que LEACH est le premier protocole hiérarchique et tous les autres protocoles ne sont que des extensions de celui-ci qui ont été optimisés dans des termes spécifiques.

Dans cette thèse, nous avons proposé un système intelligent d'irrigation basé sur l'utilisation de RCSF où nous avons optimisé le protocole de routage LEACH en termes de temps réel et de contraintes d'énergie, nous avons également évalué la performance de cette nouvelle extension avec le protocole original en termes de consommation d'énergie, de données dans le Sink, de nombre de cluster. A la fin, nous avons conclu que cette nouvelle extension du protocole de routage LEACH garantit la QoS (temps et contraintes d'énergie) en arrêtant d'envoyer le message qui ne respecte pas nos contraintes. En termes de perspective, nous aimerions :

- Améliorer les résultats obtenus en appliquant le module de récolte d'énergie au niveau des noeuds.
- Appliquer cette nouvelle extension dans un système d'irrigation réel.

# Bibliographie

- [1] M. S. Obaidat and S. Misra, “Introduction to wireless sensor networks,” in *Principles of Wireless Sensor Networks*. Cambridge : Cambridge University Press, Dec. 2014, pp. 1–13.
- [2] L. J. G. Villalba, A. L. S. Orozco, A. T. Cabrera, and C. J. B. Abbas, “Routing protocols in wireless sensor networks,” *Sensors (Basel)*, vol. 9, no. 11, pp. 8399–8421, Oct. 2009.
- [3] R. Hadim and H. Ibouainene, “La problématique de l’eau d’irrigation agricole en algérie cas : L’office national de l’irrigation et de drainage (ONID),” Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, Jul. 2021.
- [4] M. Cui, G. Zhang, and R. Zhang, “Secure wireless communication via intelligent reflecting surface,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 1410–1414, 2019.
- [5] J. Zheng and A. Jamalipour, *Wireless Sensor Networks : A Networking Perspective*. Wiley, 2009. [Online]. Available : <https://books.google.dz/books?id=qOPk-NWkgiMC>
- [6] Y. Ben Aissa, “Le fonctionnement optimale du réseau de capteurs sans fil sous la variation de la température,” Ph.D. dissertation, 2016.
- [7] A. Wadaa, S. Olariu, L. Wilson, M. Eltoweissy, and K. Jones, “Training a wireless sensor network : Algorithmic solutions for wireless, mobile, ad hoc and sensor networks (guest editors : Amotz bar-noy, alan a. bertossi, cristina m. pinotti and cauligi s. raghavendra),” *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, 02 2005.
- [8] N. Ray and A. Turuk, *Handbook of Research on Advanced Wireless Sensor Network Applications, Protocols, and Architectures*, ser. Advances in Wireless

- Technologies and Telecommunication (2327-3305). IGI Global, 2016. [Online]. Available : <https://books.google.dz/books?id=fmLDAAAQBAJ>
- [9] F. M. Muharam, “Wireless sensor network (wsn) applications in plantation canopy areas : A review.”
- [10] N. Rekha *et al.*, “Wireless sensor networks (wsn),” *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 3706–3708, 2015.
- [11] K. Malik and M. Yaqoob, “An analytical survey on routing protocols for wireless sensor network (wsn),” *International Journal of Computer Applications*, vol. 107, pp. 40–45, 12 2014.
- [12] S. D. Indu *et al.*, “Wireless sensor networks : Issues & challenges,” *International Journal of Computer Science and Mobile Computing (IJCSMC)*, vol. 3, pp. 681–85, 2014.
- [13] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks : Theory and Practice*, ser. Wireless Communications and Mobile Computing. Wiley, 2010. [Online]. Available : <https://books.google.dz/books?id=8c6k0EVr6rMC>
- [14] S. Yellampalli, *Wireless Sensor Networks : Design, Deployment and Applications*. IntechOpen, 2021. [Online]. Available : <https://books.google.dz/books?id=dG5EEAAAQBAJ>
- [15] I. Akyildiz, S. WY, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks : A survey,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393–422, 03 2002.
- [16] N. Shabbir, *Routing Protocols for Wireless Sensor Networks (WSNs)*. IntechOpen, 2017. [Online]. Available : <https://books.google.dz/books?id=HSKdzQEACAAJ>
- [17] S. Aslam, F. Farooq, and D. S. Sarwar, “Power consumption in wireless sensor networks,” 12 2009.
- [18] “World population prospects : The 2017 revision,” accessed : 2022-06-05. [Online]. Available : <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html>

- [19] W. Li, M. Awais, W. J. Ru, W.-H. Shi, M. Ajmal, S. Uddin, and C. Liu, “Review of sensor network-based irrigation systems using iot and remote sensing,” *Advances in Meteorology*, vol. 2020, pp. 1–14, 2020.
- [20] J. Balendonck, J. Hemming, B. Tuijl, L. Incrocci, A. Pardossi, and P. Marzalletti, “Sensors and wireless sensor networks for irrigation management under deficit conditions (flow-aid),” 01 2008.
- [21] F. R. Lamm *et al.*, “Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation,” pp. 1–13, 2002.
- [22] C. Brouwer, K. Prins, M. Kay, and M. Heibloem, “Méthodes d’irrigation,” *FAO, Italy*, 1990.
- [23] “Sprinkler irrigation systems,” accessed : 2022-06-05. [Online]. Available : <https://www.jains.com/irrigation/sprinkler%20Irrigation%20systems.htm>
- [24] “Flood irrigation : Should i use it?” accessed : 2022-06-05. [Online]. Available : <https://www.agrivi.com/blog/modern-management-of-centennial-furrow-irrigation/>
- [25] T. John, Ogbiti, H. Ukwuoma, S. Danjuma, and M. Ibrahim, “Energy consumption in wireless sensor network,” 01 2016.
- [26] O. Odeyinka, O. Ajibola, C. Micheal, O. Nosiri, and N. Onuekwusi, “A review on conservation of energy in wireless sensor networks,” *International Journal of Smart Sensor Technologies and Applications*, vol. 1, 07 2021.
- [27] M. Khan, M. Shiraz, Q. Shaheen, S. Butt, R. Akhtar, M. Khattak, and C. Wang, “Hierarchical routing protocols for wireless sensor networks : Functional and performance analysis,” *Journal of Sensors*, vol. 2021, pp. 1–18, 05 2021.
- [28] L. Chan, K. Chavez, H. Rudolph, and A. Al-Hourani, “Hierarchical routing protocols for wireless sensor network : a compressive survey,” *Wireless Networks*, vol. 26, 07 2020.
- [29] D. Xu and J. Gao, “Comparison study to hierarchical routing protocols in wireless sensor networks,” *Procedia Environmental Sciences*, vol. 10, pp. 595–600, 2011, 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology ESIAT 2011. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187802961100291X>

- [30] J. Wang, Y. Gao, X. Yin, F. Li, and H.-J. Kim, "An enhanced pegasis algorithm with mobile sink support for wireless sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, pp. 1–9, 12 2018.
- [31] Q. Liu, K. Zhang, X. Liu, and N. Linge, "Grid routing : An energy-efficient routing protocol for wsns with single mobile sink," 07 2016, pp. 232–243.
- [32] S. R. A. Salam Al-Ammri, "Smart irrigation system using wireless sensor network," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH TECHNOLOGY (IJERT) Volume 03*, 01 2014.
- [33] L. Hamami and N. Bouchaib, "Towards a smart irrigation system based on wireless sensor networks (wsns)," 01 2018, pp. 433–442.
- [34] L. Hamami and B. Nassereddine, "Application of wireless sensor networks in the field of irrigation : A review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 179, p. 105782, 2020. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920310528>
- [35] L. Kamarudin, R. Ahmad, D. Ndzi, A. Zakaria, K. Kamarudin, and M. Elshaikh, "Simulation and analysis of leach for wireless sensor networks in agriculture," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 21, pp. 16–26, 01 2016.
- [36] R. S. M. Alyousuf, "Analysis and comparison on algorithmic functions of leach protocol in wireless sensor networks [wsn]," in *2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, 2020, pp. 1349–1355.
- [37] M. Bhadu and U. Kumari, "Leach : Energy efficient routing protocol for wsns along with its enhancements," *International Journal of Engineering Research and*, vol. V5, 11 2016.
- [38] M. Z. Hasan, H. Al-Rizzo, and F. Al-Turjman, "A survey on multipath routing protocols for qos assurances in real-time wireless multimedia sensor networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1424–1456, 2017.
- [39] J. A. Stankovic, M. Spuri, K. Ramamritham, and G. C. Buttazzo, *Deadline scheduling for real-time systems : EDF and related algorithms*. Springer Science & Business Media, 2012, vol. 460.

- [40] Y. Ben Aissa, A. Bachir, M. Khalgui, A. Koubaa, Z. Li, and T. Qu, "On feasibility of multichannel reconfigurable wireless sensor networks under real-time and energy constraints," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems*, vol. 51, no. 3, pp. 1446–1461, 2021.
- [41] R. Y. Lee, *Computers, Networks, Systems, and Industrial Engineering 2011*, ser. Studies in Computational Intelligence. Berlin, Heidelberg : Springer, 2011, vol. 365, ch. 18, p. 211.
- [42] Y. B. Aissa, O. Mosbahi, M. Khalgui, and A. Bachir, "New scheduling mechanism in multi-channel reconfigurable wsn under qos and energy constraints," in *32nd annual European Simulation and Modelling Conference 2018*, Ghent, Belgium, 2018, pp. 187–191.
- [43] M. Tahir, F. Khan, S. R. Jan, N. Azim, I. A. Khan, and F. Ullah, "Eec : Evaluation of energy consumption in wireless sensor networks," *International Journal of Engineering Trends and Applications, ISSN*, pp. 2393–9516, 2016.
- [44] S. Kurt, H. U. Yildiz, M. Yigit, B. Tavli, and V. C. Gungor, "Packet size optimization in wireless sensor networks for smart grid applications," *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2392–2401, 2017.
- [45] "What is omnet++?" June 2022. [Online]. Available : <https://omnetpp.org/intro/>
- [46] Alistar542, "Leach omnet," 2021. [Online]. Available : [https://github.com/Alistar542/LEACH\\_OMNET](https://github.com/Alistar542/LEACH_OMNET)