

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de  
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université 20 Aout 1955, Skikda**

**Faculté de Sciences**

**Département Informatique**



**Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master académique en  
Informatique  
Option : 'Réseaux et Systèmes Distribués (RSD)'**

**La Modélisation/Simulation des Protocoles de Routage dans les  
Réseaux de Capteurs sans Fil**

**Réalisé par :**

- Bouanika Mehdi
- Houssou Yasser

**Dirigé par :**

Pr. Redjimi Mohammed

**Session : Juin 2024**

## Remerciements

Tout d'abord, nos louanges et remerciements vont à Dieu le tout-puissant qui nous a donné la force de réaliser ce travail.

Nous sommes extrêmement reconnaissants envers le professeur **Redjimi Mohammed** pour le sujet très passionnant qu'il nous a proposé, pour sa disponibilité sans réserve dont il a fait preuve à notre égard, ainsi que pour les nombreuses discussions que nous avons eues avec lui et les précieuses et judicieuses aides qu'il nous a apporté.

Au terme de la réalisation de ce mémoire, nous tenons à adresser nos remerciements à tous les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail ainsi qu'à toute personne ayant participé, de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

**A tous, Merci**



## **Résumé**

Les protocoles de routage sont essentiels pour assurer une communication efficace et fiable dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Étant donné les contraintes spécifiques des RCSF, telles que la faible puissance des capteurs, la capacité limitée de traitement et la variabilité des conditions environnementales, les protocoles de routage doivent être optimisés pour minimiser la consommation d'énergie et maximiser la durée de vie du réseau.

Les simulateurs jouent un rôle crucial dans l'évaluation et l'optimisation des protocoles de routage pour les RCSF. Ils permettent de modéliser et de tester les protocoles dans divers scénarios avant leur déploiement réel. Dans ce mémoire, un mini-simulateur basé sur MATLAB est présenté et appliqué à la simulation du protocole hiérarchique LEACH.

**Mots-clés** : les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, l'environnement MATLAB, LEACH.

## **Abstract**

Routing protocols are essential to ensure efficient and reliable communication in wireless sensor networks (WSNs). Given the specific constraints of WSNs, such as low sensor power, limited processing capacity, and variability in environmental conditions, routing protocols must be optimized to minimize energy consumption and maximize network lifetime.

Simulators play a crucial role in evaluating and optimizing routing protocols for WSNs. They allow protocols to be modeled and tested in various scenarios before their actual deployment. In this dissertation, a mini-simulator based on MATLAB is presented and applied to the simulation of the hierarchical LEACH protocol.

**Keywords:** wireless sensor networks (WSNs), routing protocols in wireless sensor networks, MATLAB environment, LEACH.

تعد بروتوكولات التوجيه ضرورية لضمان الاتصال الفعال والموثوق في شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs). نظرًا للقيود المحددة لشبكات WSN، مثل انخفاض طاقة المستشعر، وقدرة المعالجة المحدودة، والتباين في الظروف البيئية، يجب تحسين بروتوكولات التوجيه لتقليل استهلاك الطاقة وزيادة عمر الشبكة إلى أقصى حد.

تلعب المحاكيات دورًا حاسمًا في تقييم وتحسين بروتوكولات التوجيه لشبكات WSN. إنها تسمح بنمذجة البروتوكولات واختبارها في سيناريوهات مختلفة قبل نشرها الفعلي. في هذه الأطروحة، تم تقديم محاكي صغير يعتمد على MATLAB وتطبيقه على محاكاة بروتوكول LEACH الهرمي.

**الكلمات المفتاحية:** شبكات الحساسات اللاسلكية (WSNs)، بروتوكولات التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية، بيئة

LEACH، MATLAB

# Table des matières

Introduction générale .....	1
<i>Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil .....</i>	<i>4</i>
1. Introduction .....	4
2. Les réseaux Ad Hoc :.....	4
3. Les Capteurs sans fils .....	5
3.1. Définition d'un capteur .....	5
3.2. Les types de capteurs.....	6
3.2.1. En fonction de la grandeur mesurée.....	6
3.2.2. En fonction du caractère de Tout Ou Rien (TOR) de l'information délivrée : .....	7
3.3. Architecture d'un capteur.....	8
4. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) .....	10
4.1. Définition d'un RCSF .....	10
4.2. Architecture des réseaux de capteurs sans fil.....	11
4.2.1. Architecture à plat :.....	11
4.2.2. Architecture hiérarchique : .....	12
4.3. Les Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil .....	12
5. La pile protocolaire dans un RCSF.....	13
5.1. Les Couches de la pile protocolaire .....	14
6. Comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-hoc :.....	15
7. Facteurs et contraintes de conception des RCSFs .....	16
8. Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil.....	18
9. Les systèmes d'exploitation pour les réseaux de capteurs : .....	21
9.1. TinyOS :.....	21
9.2. Bluetooth (IEEE 802.15.4).....	22
9.3. Contiki.....	22
10. Conclusion .....	22
<i>Chapitre 2 : Les protocoles de routage dans les réseaux de capteur sans fil .....</i>	<i>26</i>
1. Introduction .....	27

2.	Définition de routage .....	27
3.	Protocole de routage .....	27
3.1.	L'objectif de protocole de routage .....	27
4.	Classification des protocoles de routage dans RCFS .....	28
4.1.	Selon la topologie du réseau.....	29
4.1.2.	Protocoles de routages hiérarchiques.....	32
4.2.	Selon l'établissement des chemins.....	36
4.2.1.	Les protocoles proactifs .....	36
4.2.2.	Les protocoles réactifs .....	38
4.2.3.	Les protocoles hybrides .....	39
4.3.	Selon le paradigme de communication .....	40
4.4.	Selon le mode de fonctionnement du protocole .....	42
4.5.	Selon le type d'application.....	44
5.	Conclusion.....	44
<i>Chapitre 3 : La simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil.....</i>		<i>45</i>
1.	Introduction .....	46
2.	La modélisation/simulation dans les RCsFs.....	46
2.1.	Aspects liés à la simulation .....	48
2.2.	Intérêts de la Modélisation/Simulation .....	50
2.3.	Le processus de Modélisation/Simulation.....	52
2.4.	Outils pour la simulation .....	54
3.	Les paramètres de simulation .....	61
4.	Conclusion.....	63
<i>Chapitre 4 : Simulation du protocole LEACH.....</i>		<i>64</i>
1.	Introduction .....	65
2.	Simulation des Protocoles de Routage dans les Réseaux de Capteurs sans Fil avec MATLAB.....	65
2.1.	Étapes de la Simulation avec MATLAB.....	65
3.	Interfaces graphique de l'application .....	67
3.1.	Interface graphique de déploiement des nœuds du réseau .....	67
3.2.	Exemple de déploiement .....	68

3.3. les Courbes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
4. Conclusion .....	72
Conclusion Générale et Perspectives .....	75
Bibliographie.....	76

## Liste des figures

Figure 1.1 : Réseau Ad Hoc [2]. -----	5
Figure 1.2 : Schéma d'un capteur [4]. -----	6
Figure 1.3 : Capteur sans fil [6]. -----	6
Figure 1.4 : Quelques exemples de capteurs [4]. -----	7
Figure 1.5 : Architecture d'un nœud de capteur [8]. -----	9
Figure 1.6 : Exemple d'un réseau de capteur sans fil [12]-----	10
Figure 1.7 : Fonctionnant RCSF selon un mode d'architecture à plat [14].-----	12
Figure 1.8 : Fonctionnant RCSF selon un mode d'architecture hiérarchique [14]. -----	12
Figure 1.9 : La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs [14]. ---	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 1.10 : l'utilisation des RCSF dans le service militaire [7]. -----	18
Figure 1.11 : Exemple d'un système de monitoring cardiaque d'AliveCore avec capteur biométrique et application pour iPhone [14]. -----	19
Figure 1.12 : Applications environnementales [19].-----	20
Figure 1.13 : Applications à la sécurité de RCSF[19]. -----	21
Figure 1.14 : Application agricoles de RCSF [19]. -----	21
Figure 2.1 : : Classification des protocoles de routage dans les RCSF [23]. -----	29
Figure 2.2: : Topologie plate [22].-----	30
Figure 2.3 : SPIN Protocole -----	32
Figure 2.4: : Topologie hiérarchique [30]. -----	33
Figure 2.5: Paradigme de routage dans LEACH [27].-----	35
Figure 2.6: Le protocole PEGASIS. -----	36
Figure 2.7: Exemple de réseau utilisant le protocole DSDV. -----	37
Figure 2.8: Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV [31] -----	38

Figure 2.9 : Exemple de fonctionnement du protocole ZRP -----	40
Figure 3.1: Cadre conceptuel pour la modélisation/simulation -----	52
Figure 4.1 : Modèle d'énergie (adapté de Heinzelman et al., 2002) -----	66
Figure 4.2 : Interface de l'application -----	68
Figure 4.3: Création du réseau de capteur sans fil-----	69
Figure 4.4: Nœuds opérationnels par round -----	70
Figure 4.5 : Nœuds opérationnels -----	71
Figure 4.6: énergie consommée-----	72
Figure 4.7 : énergie consommée par nœuds par transmission-----	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1:</b> Comparaison entre un RCSF et un réseau Ad Hoc. ....	16
<b>Tableau 3.1 :</b> Quelques simulateurs des RCsF .....	60
<b>Tableau 3.2 :</b> Exemples de Paramètres de simulation .....	63
<b>Tableau 4.1:</b> Paramètres de simulation.....	69

## Liste des abréviations

**RCSF** :Réseaux de Capteurs Sans Fil

**CH**: Cluster Head

**LEACH**: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical

**MATLAB** : MATrix LABoratory

**SB** : Station de base

**CAN** : Convertisseur Analogique-Numérique

**GPS** : Global Positioning System

**MAC**: Media Access Control

**IP**: Internet Protocol

**REQ**: REQUEST

**TDMA**: Time Division Multi Access

**OSI**: International Standardization Organization

**QoS**: Quality of Service

**WSN**: Wireless Sensor Network

# **Introduction générale**

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent une avancée technologique majeure dans le domaine des systèmes de communication et des réseaux. Ils sont composés de nombreux capteurs autonomes, répartis de manière stratégique pour collecter, traiter et transmettre des données environnementales. Ces capteurs peuvent surveiller diverses variables telles que la température, l'humidité, la pression, le mouvement et même les composés chimiques. Grâce à leur capacité à fonctionner de manière autonome et à communiquer sans fil, les RCSF sont utilisés dans un large éventail d'applications, allant de la surveillance environnementale et des soins de santé à la gestion des infrastructures et à la sécurité.

Les réseaux de capteurs sans fil représentent une technologie clé pour le développement de solutions intelligentes dans divers domaines. Les simulateurs de RCSF offrent une plateforme indispensable pour explorer, concevoir et optimiser ces réseaux, ouvrant la voie à des innovations continues et à l'amélioration des applications existantes.

## **Défis et Opportunités**

Les RCSF présentent plusieurs défis techniques, notamment en termes de gestion de l'énergie, de robustesse face aux conditions environnementales variées et de sécurité des données. Cependant, les avancées en matière de technologies de batteries, de protocoles de communication et de cryptographie offrent de nouvelles opportunités pour surmonter ces défis et améliorer les performances et la fiabilité des réseaux de capteurs sans fil.

## **Simulateurs pour les RCSF**

Afin de concevoir, tester et optimiser les RCSF, les simulateurs jouent un rôle crucial. Ils permettent aux chercheurs et aux ingénieurs de modéliser les réseaux, de tester différentes configurations et de prévoir les performances sans avoir besoin de déployer physiquement le réseau. Les simulateurs de RCSF peuvent évaluer divers aspects tels que la consommation d'énergie, la couverture du réseau, la fiabilité de la communication et la gestion des interférences.

## **Principaux Simulateurs de RCSF**

Parmi les simulateurs les plus utilisés pour les RCSF, on trouve :

- **NS-3 (Network Simulator 3)** : Un simulateur de réseau discret qui fournit un environnement réaliste pour tester les protocoles de réseau et les architectures de RCSF.
- **OMNeT++** : Une plateforme de simulation modulaire et extensible, particulièrement utilisée pour les réseaux de communication et les systèmes distribués.
- **Cooja** : Un simulateur conçu pour le système d'exploitation Contiki, largement utilisé pour les réseaux de capteurs dans les environnements contraints en énergie.

## **Méthodologie**

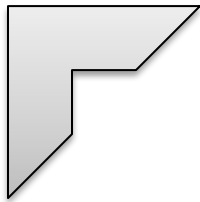
Après avoir passé en revue différents aspects concernant les réseaux de capteurs sans fil et simulateurs largement utilisés, nous nous sommes intéressés à la conception et à la réalisation d'un mini-simulateur dont la programmation est faite sous MATLAB et un exemple de simulation concerne le protocole de routage hiérarchique LEACH (Low Energy Adaptable Clustering Hierarchy).

## **Structure du mémoire**

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

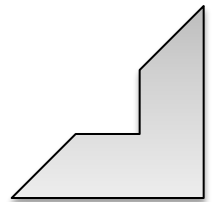
- Le premier chapitre est consacré aux notions de base des réseaux de capteurs sans fil.
- Le second chapitre traite des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil.
- Le troisième chapitre est dédié aux simulateurs des réseaux de capteurs sans fil.
- Le quatrième et dernier chapitre traite de l'implémentation d'une solution qui met en œuvre un système de simulation écrit sous MATLAB.

Une conclusion générale, quelques perspectives et des références closent ce mémoire.



## **Chapitre 1 :**

# **Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil**



## **1. Introduction**

Le réseau de capteurs sans fil est une technologie émergente et un domaine en constante évolution, et de plus en plus d'applications utilisent cette technologie. En fait, les nouvelles technologies électroniques et informatiques d'aujourd'hui peuvent développer de petits appareils, des capteurs peuvent calculer des informations, capturer des données et utiliser ces données collectées pour communiquer via le réseau.

Dans ce chapitre, nous décrivons les réseaux de capteurs sans fil et leur architecture, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application et leurs contraintes de conception.

## **2. Les réseaux Ad Hoc :**

Un réseau ad hoc est une collection d'hôtes équipés par des interfaces Sans fil qui peuvent communiquer entre eux sans aucune administration centralisée, en utilisant une technologie de communication sans fil comme Wifi, Bluetooth, etc.

A l'opposé des réseaux filaires ou uniquement certains nœuds dits "routeurs" sont responsables de l'acheminement des données, dans un réseau ad hoc tous les nœuds sont à la fois routeurs et terminaux. Le choix des nœuds qui vont assurer une session de communication dans un réseau Ad-hoc se fait dynamiquement selon la connectivité du réseau, d'où l'appellation "Ad Hoc » [1].

Dans un réseau ad-hoc, un nœud peut communiquer directement (mode point-à-point) avec n'importe quel nœud s'il est situé dans sa zone de transmission, tandis que la communication avec un nœud situé en dehors de sa zone de transmission s'effectue via plusieurs nœuds intermédiaires (mode multi-sauts) [2]. **La figure 1.1** représenter un Réseau Ad Hoc

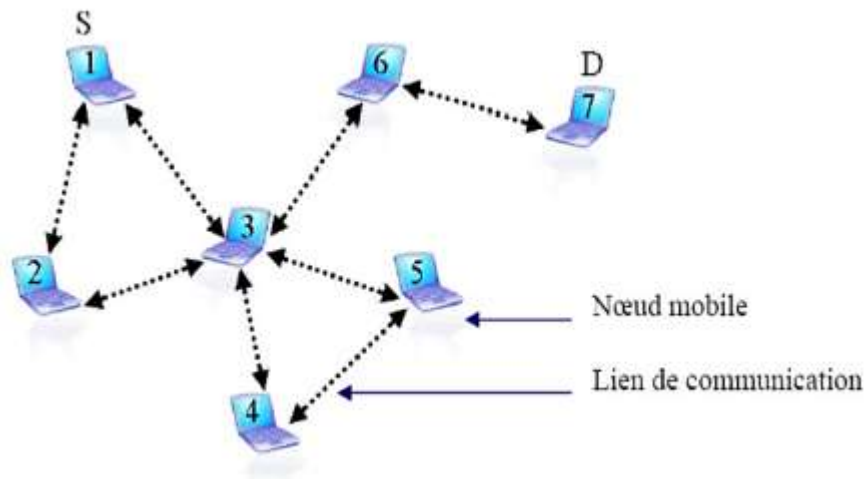


Figure 1.1 : Réseau Ad Hoc [2].

### 3. Les Capteurs sans fils

#### 3.1. Définition d'un capteur

C'est un système qui sert à détecter, sous forme de signal souvent électrique, un phénomène physique afin de le représenter. Les capteurs sont des petits appareils dotés d'une batterie, capables de communiquer entre eux et de détecter des événements s'ils se trouvent à l'intérieur de leur rayon de perception.

Un capteur est un petit appareil doté de mécanismes lui permettant de relever des informations sur son environnement. La nature de ces informations varie très largement selon l'utilisation qui est faite du capteur : ce dernier peut tout aussi bien faire des relevés de température, d'humidité ou d'intensité lumineuse. Un capteur possède également le matériel nécessaire pour effectuer des communications sans-fil par ondes radio [3].

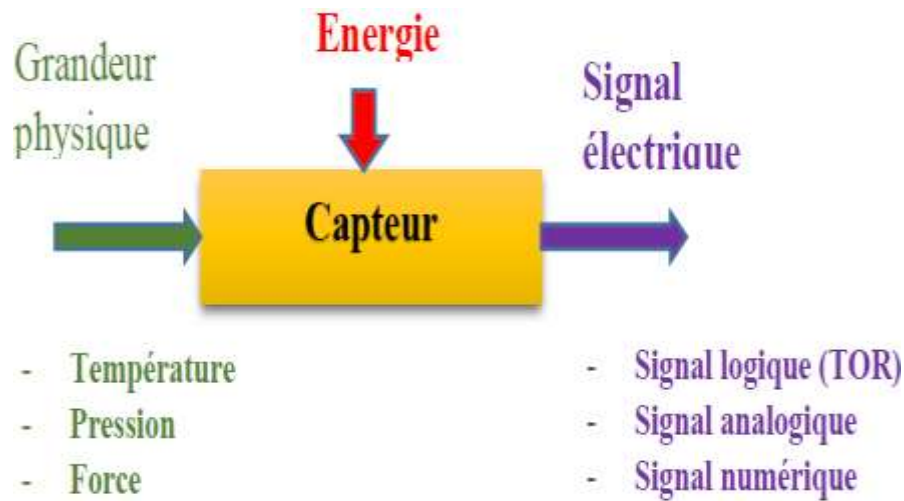


Figure 1.2 : Schéma d'un capteur [4].

Chaque capteur effectue trois tâches principales : collecter, traiter et communiquer des données à une ou plusieurs stations de collecte appelées station de base. **La figure 1.3** montre des capteurs actuellement utilisés [5].

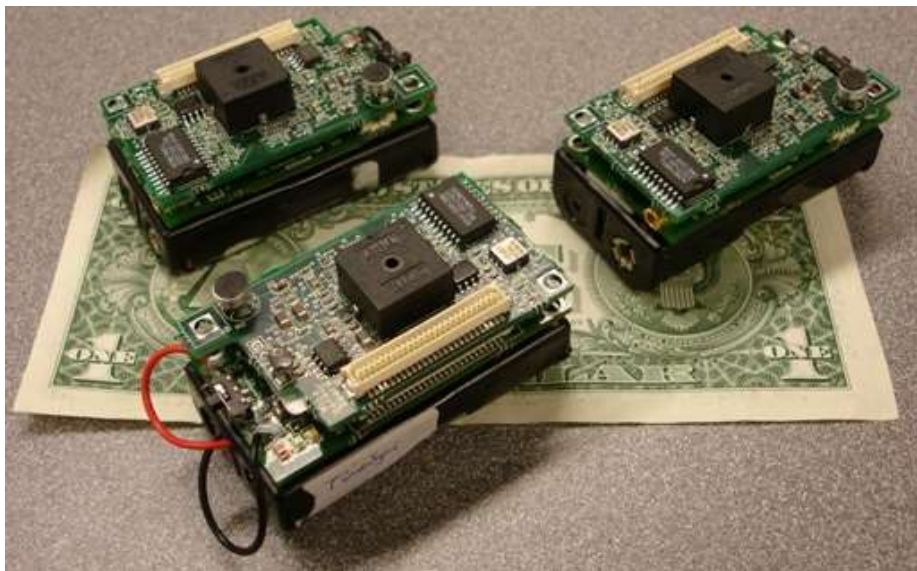


Figure 1.3 : Capteur sans fil [6].

### 3.2. Les types de capteurs

Nous pouvons caractériser les capteurs selon deux critères [7] :

- 3.2.1. En fonction de la grandeur mesurée :** Cette classification englobe les capteurs de position, de température, de vitesse, de force, de pression, etc.



Figure 1.4 : Quelques exemples de capteurs [4].

### 3.2.2. En fonction du caractère de Tout Ou Rien (TOR) de l'information délivrée :

On distingue les capteurs logiques, également appelés capteurs Tout Ou Rien (TOR), les capteurs analogiques et les capteurs numériques.

#### a. Capteurs logiques (TOR) :

Ces capteurs produisent des signaux binaires à deux états. Bien qu'ils soient économiques, leur spécialisation les rend adaptés à des mesures spécifiques.

#### b. Capteurs numériques :

Les capteurs numériques génèrent en sortie une information électrique numérique. Le signal peut être récupéré en série ou en parallèle, fournissant ainsi une valeur finie en sortie. Par exemple, si une grandeur physique évolue de manière linéaire, le signal de sortie peut adopter la forme d'une information TOR, d'un train d'impulsions ou d'un échantillonnage.

#### c. Capteurs analogiques :

La grandeur de sortie des capteurs analogiques est directement liée à la grandeur d'entrée. Ces capteurs doivent être linéaires pour éviter toute déformation du signal. Si la grandeur physique peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné, on parle de signal analogique.

L'avantage de ce type de capteur est la possibilité de mesurer sur toute la plage, pas uniquement à un seuil.

Les capteurs analogiques peuvent être classés en deux catégories [7] :

#### **Capteurs actifs :**

Un capteur actif est un dispositif de mesure qui est autonome et dispose de sa propre alimentation énergétique. Ce type de capteur assure non seulement le filtrage et la mesure des propriétés du signal, mais effectue également des étapes de traitement de communication supplémentaires via des circuits électroniques intégrés. Un avantage important des capteurs actifs est d'assurer une réponse en temps réel [7].

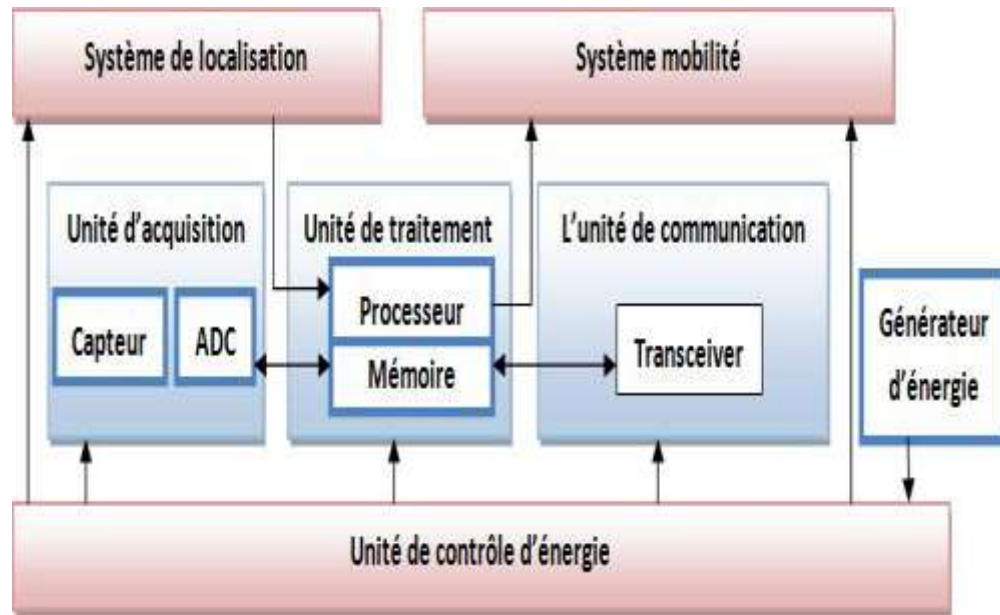
#### **Capteurs passifs :**

Contrairement aux capteurs précédents, les capteurs passifs n'ont pas de source d'alimentation, sont plus faciles à monter sur un support (substrat) et sont utilisés dans des applications à cordes dans les domaines médical, aéronautique et aérospatial. Ce type de capteur se caractérise par une réponse fiable et précise dans un format miniaturisé Passif. La technique de transfert dans ce cas repose sur deux types : le transfert inductif et le transfert capacitif [7].

### **3.3. Architecture d'un capteur**

Un nœud capteur est composé de quatre unités fondamentales : une unité de capture, une unité de traitement, une unité de communication et une unité de contrôle de l'énergie. En fonction de son domaine d'application, il peut aussi inclure des modules supplémentaires comme un système GPS ou une source d'énergie additionnelle telle qu'une cellule solaire. Même les micro-capteurs légèrement plus grands peuvent intégrer ces éléments [9].

**Figure 1.5** présente une représentation générale de l'architecture typique D'un nœud capteur, montrant les différents composants d'un capteur.



**Figure 1.5 :** Architecture d'un nœud de capteur [8].

- **Unité d'acquisition :**

Comprend un capteur chargé de collecter des mesures numériques des paramètres environnementaux. Ces mesures sont ensuite converties en signaux numériques à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique. Ces signaux numériques sont transmis à l'unité de traitement pour être analysés et traités [10].

- **Unité de traitement :**

Est constituée de deux interfaces, l'une connectée à l'unité d'acquisition et l'autre à l'unité de communication. Sa fonction principale est d'assurer le contrôle adéquat du bon fonctionnement des autres unités. Certains modèles peuvent embarquer un système d'exploitation nécessaire au fonctionnement du capteur [9].

- **Unité de communication :**

Cette unité assume la responsabilité de toutes les émissions et réceptions de données, utilisant un émetteur/récepteur pour accomplir ces opérations.

- **Unité de contrôle d'énergie :** Un capteur est pourvu d'une batterie pour alimenter l'ensemble de ses composants. Cependant, en raison de sa petite taille, la batterie dont il est doté est limitée et généralement non remplaçable. Par conséquent, l'énergie constitue la ressource la plus précieuse pour un capteur, car elle influe directement sur sa durée de vie. Cette réalité en fait la contrainte principale à prendre en considération lors de la conception et de l'utilisation d'un capteur [10].

## 4. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

### 4.1. Définition d'un RCSF

Un réseau de capteurs sans fil est une variante spécifique des réseaux ad hoc. Il se compose d'un grand nombre de capteurs qui communiquent entre eux via des liaisons radio pour partager des informations et collaborer dans le traitement des données. Dans ce type de réseau, les capteurs échangent des informations, par exemple sur l'environnement, afin de construire une vue globale de la zone surveillée. Cette vue est rendue accessible aux utilisateurs externes par le biais d'un ou plusieurs nœuds. Les données collectées par ces capteurs sont acheminées de proche en proche vers un point central de collecte appelé station de base (ou SINK). Cette station de base peut être connectée à une machine puissante via Internet ou par satellite (cf. fig.1.6). De plus, les utilisateurs ont la possibilité d'envoyer des requêtes ciblées aux capteurs en spécifiant les informations qui les intéressent. Le déploiement des nœuds capteurs est souvent très dense et peut être aléatoire ou déterministe (manuellement ou par des robots), généralement dans des zones hostiles difficilement accessibles par les êtres humains [11].

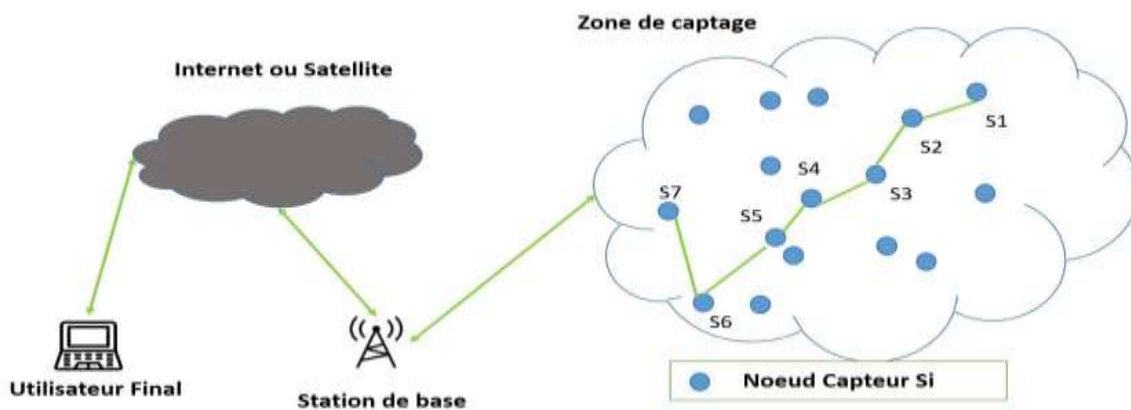


Figure 1.6 : Exemple d'un réseau de capteur sans fil [12]

Le fonctionnement des réseaux de capteurs repose sur l'interaction entre les trois composants essentiels suivants [13] :

**a. Noeud capteur :**

Chaque nœud est à la base capable de détecter des données de l'environnement surveillé, de générer les bits d'informations correspondantes et de les stocker pour les transmettre ultérieurement. La position de nœud n'est pas obligatoirement prédéterminée. Il peut être aléatoirement réparti dans une zone de captage.

**b. Station de base :**

Nommé aussi nœuds-puits c'est un nœud important du réseau. Son rôle diffère de celui des autres nœuds du réseau car sa tâche est de collecter les données qui proviennent des autres nœuds du réseau. Il se caractérise par une activité constante et une énergie permanente.

**c. Zone de captage :**

Appelée aussi zone d'intérêt, c'est une zone géographique où on déplace les capteurs du réseau pour superviser ou surveiller des phénomènes divers.

## **4.2. Architecture des réseaux de capteurs sans fil**

L'infrastructure de communication dans le Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) facilite le transfert des données depuis divers nœuds capteurs jusqu'à la station de base, également appelée le "Sink". Cette transmission peut être réalisée à travers deux types d'architectures : l'architecture à plat et l'architecture hiérarchique.

### **4.2.1. Architecture à plat :**

Dans cette architecture, tous les nœuds sont identique en termes de batterie et de complexité de matériel aussi la densité de capteurs élevée, ce ci fabrique un réseau homogène. Ces nœuds peut communique avec le sink (jeu un rôle de passerelle) par la communication multi saut [13].

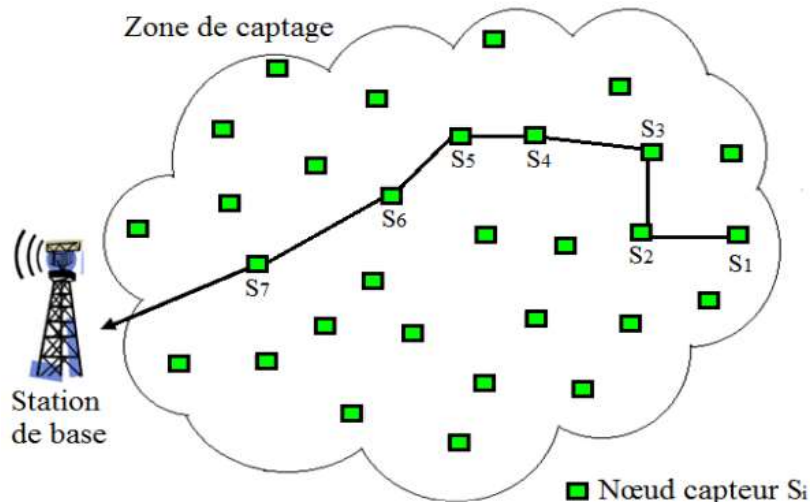


Figure 1.7 : Fonctionnant RCSF selon un mode d'architecture à plat [14].

#### 4.2.2. Architecture hiérarchique :

Cette architecture se compose de cluster qui inclut un group des nœuds appelés membre de cluster, et cluster Head (CH) qui est chargé de collecter les informations auprès des membres (nœuds) au sein du cluster pour les envoyer à la station de base (Sink). Chaque CH peut communiquer avec d'autre cluster Head [12].

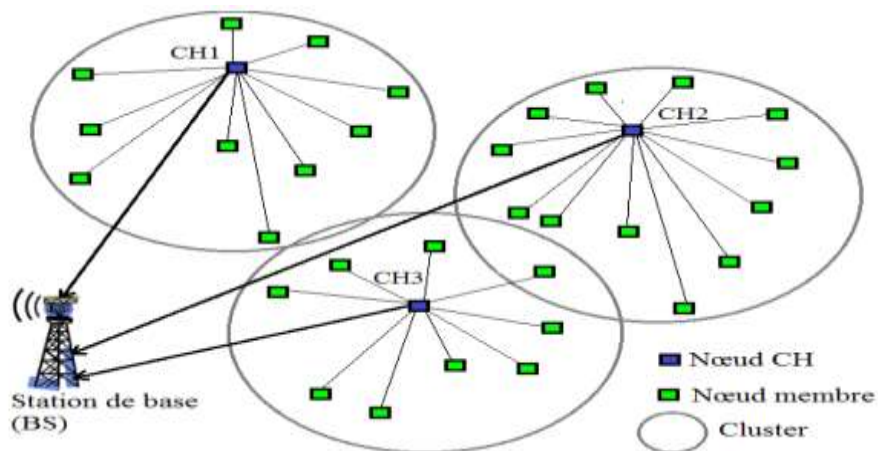


Figure 1.8 : Fonctionnant RCSF selon un mode d'architecture hiérarchique [14].

### 4.3. Les Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs sont [9] :

- Sans infrastructure :

Les capteurs sont habituellement déployés d'une façon aléatoire dans des zones d'intérêt, ils doivent se façonner et s'organiser eux-mêmes sans intervention humaine.

- **Scalabilité :**

Les capteurs dans les RCSFs, sont déployés habituellement en grand nombre pour assurer la couverture complète de la zone d'intérêt et pour gérer les interruptions.

- **Interférences :**

Le concept d'interférence apparaît dans la plupart des réseaux sans fil, et notamment dans le RCSF où deux capteurs adjacents peuvent émettre dans le même saut de fréquence ce qui provoquera des interférences.

- **Topologie dynamique :**

Des capteurs sans fil peuvent être fixés sur des objets en mouvement, tels que des animaux, pour les surveiller de près. Sans interférer avec leur comportement. Ce genre de scénario engendre une topologie dynamique [10].

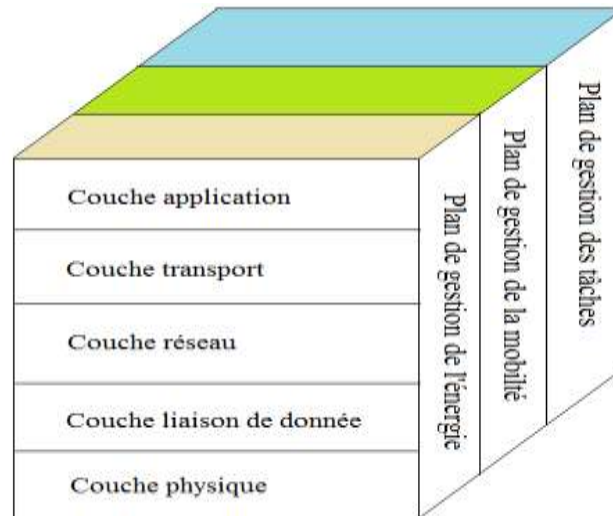
- **Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul :**

La limite des ressources énergétiques est la caractéristique la plus critique dans les RCSFs. Le majeur problème traité dans la plupart des travaux de recherche est l'énergie.

## **5. La pile protocolaire dans un RCSF**

Le rôle de la pile consiste notamment à standardiser la communication entre les composants du réseau afin que différents fabricants puissent développer des produits (logiciels ou matériels) compatibles. La pile protocolaire comprend 5 couches : couche application, couche transport, couche réseau, couche liaison de données et couche physique ; et 3 plans de gestion : plan de gestion des tâches, permettant l'allocation correcte des tâches aux nœuds capteurs ; plan de gestion de la mobilité, dans la phase de routage. Préserve une image des emplacements des nœuds et gère l'énergie planifiée, permettant une répartition maximale des tâches. Conservation de l'énergie.

L'objectif d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties en fonction du niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec les couches adjacentes. Ainsi, chaque couche consomme les services de la couche inférieure et les fournit à la couche supérieure.



**Figure 1.9 :** La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs [14].

### 5.1. Les Couches de la pile protocolaire

- a. **La couche application :** Cette couche fournit l'interface avec l'application. Il s'agit donc du niveau le plus proche de l'utilisateur et il est géré directement par le logiciel.
- b. **La couche transport :** Cette couche est chargée de transmettre les données, de les diviser en paquets, de contrôler le flux, de maintenir l'ordre des paquets et de gérer les éventuelles erreurs de transmission [7].
- c. **La couche réseau :** Le rôle principal de la couche réseau est de router les données fournies par la couche transport de façon fiable jusqu'à la station de base, tout en essayant d'optimiser au mieux la consommation énergétique induite par l'ensemble des nœuds capteurs participant à ce routage [14].
- d. **La couche liaison :** Elle est responsable du contrôle d'erreurs (la détection et la correction), et le contrôle de puissance, de l'accès au media, etc. De plus, elle assure la liaison point à point et établit une communication saut-par-saut entre les nœuds.

Quelques protocoles de liaison de données : SMACS (Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks) et EAR (Eavesdrop And Registre) [7].

- e. **La couche physique :** Elle permet de moduler les données et le diriger avec choisir les bonnes fréquences dans le media physique [11].

## 6. Comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-hoc :

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) représente une forme particulière de réseau ad hoc. Bien que ces deux types de réseaux partagent plusieurs caractéristiques communes, ils présentent également des distinctions. Les similitudes essentielles comprennent [11] :

- Opération sans recours à une infrastructure fixe.
- Utilisation de supports sans fil pour les échanges de données.
- Utilisation de l'air comme support de transmission d'informations.
- Vulnérabilité aux problèmes d'interférences dans les communications.
- Recours à des protocoles de routage multi-sauts.
- Mise en œuvre de protocoles d'accès au médium généralement en mode half-duplex.

Cependant, des distinctions notables existent également entre les RCSFs et les réseaux ad hoc [16] :

- Le nombre de nœuds intégrés dans les RCSFs est significativement plus élevé que celui des réseaux ad hoc.
- Les RCSFs se caractérisent par une densité de déploiement plus élevée que celle des réseaux ad hoc.
- La mobilité des nœuds dans les RCSFs tend à être faible, à l'inverse des réseaux ad hoc.
- Les RCSFs présentent un risque accru de pannes par rapport aux réseaux ad hoc.
- La topologie des RCSFs change fréquemment, alors que celle des réseaux ad hoc demeure plus stable.

- Les communications au sein des RCSFs sont généralement de type diffus (un à plusieurs ou plusieurs à un), tandis que les réseaux ad hoc favorisent les communications point à point.
- Les capacités en calcul, mémoire et énergie sont trop faibles dans les RCSF contrairement aux réseaux Ad Hoc.
- Les entités d'un réseau de capteurs sans fil sont souvent inaccessibles par les humains.
- Les entités d'un réseau Ad Hoc sont directement accessibles

Voici le **tableau 1.1** qui illustre les convergences et les divergences entre un RCSF et un réseau Ad Hoc :

<i>Propriétés   Réseau</i>	<i>RCSF</i>	<i>Ad Hoc</i>
Infrastructure	Sans infra structure fixe	Sans infra structure fixe
Support de communication	Sans fil	Sans fil
Médium	Air	Air
Problème d'interférence	Sensible au problème d'interférence	Sensible au problème d'interférence
Routage	Envoi direct, Multi-sauts	Envoi direct, Multi-sauts
Accès au médium	Half-duplex	Half-duplex
Nombre de nœuds	Des centaines de milliers	Une dizaine
Densité de déploiement	Important	Moyenne
Mobilité	Faible	Forte
Pannes	Fréquents	Rare
Topologie du réseau	Changement fréquents	Fixe
Type de communication	Diffusé	Point-à-point
Capacités en ressources	Trop faible	Sans limites
Accessibilité	Inaccessible	Inaccessible

**Tableau 1.1:** Comparaison entre un RCSF et un réseau Ad Hoc.

## 7. Facteurs et contraintes de conception des RCSFs

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

- 1) **Durée de vie du réseau :** Il s'agit de la période entre le déploiement du réseau et l'épuisement de l'énergie du premier nœud. En fonction de l'application, la durée de vie nécessaire d'un réseau peut varier de quelques minutes à plusieurs années.
- 2) **Basse Consommation énergétique :** Les capteurs en fonctionnement ont de faibles pertes lors du transfert de données entre les capteurs pour économiser la consommation d'énergie. Le crédit réduit n'interfère pas avec le réseau [15]
- 3) **Coût de production :** L'évaluation du coût global d'un réseau repose sur la détermination du coût associé à chaque nœud de base. Si le coût total d'un réseau de capteurs sans fil s'avère être plus élevé que celui d'un réseau traditionnel, il est essentiel d'évaluer attentivement les avantages de cette nouvelle technologie. Par conséquent, il est impératif de minimiser le coût de chaque nouveau composant, tel que le prix d'un capteur individuel, afin de garantir la viabilité économique de la solution [5].
- 4) **Topologie dynamique :** Plusieurs facteurs peuvent induire des évolutions dans la topologie des réseaux de capteurs au fil du temps : Le déploiement des nœuds capteurs dans des environnements hostiles, tels que des champs de bataille, accroît la probabilité de défaillance d'un nœud capteur. La non-opérationnalité d'un nœud capteur peut résulter de l'épuisement de son alimentation énergétique. Dans certaines applications, tant les nœuds capteurs que les stations de base peuvent être mobiles [9].
- 5) **Limite-le coute du capteur :** Le coût élevé des capteurs actuels est attribuable à la multitude de fonctionnalités qu'ils intègrent. L'intégration de technologies telles que le GPS (Global Positioning System), un mobilisateur, ou un système de génération d'énergie spécifique aux besoins, entraîne l'augmentation du coût individuel de chaque unité. Ces fonctionnalités supplémentaires contribuent donc au coût global du capteur.
- 6) **Passage à l'échelle (Scalabilité) :** Le nombre de capteurs peut fluctuer, passant d'une entité à plusieurs, nécessitant ainsi une capacité du réseau à les organiser de manière efficace à grande échelle, indépendamment de leur quantité. Les protocoles RCSF doivent être conçus pour fonctionner de manière adaptative et ajustée en fonction du nombre de nœuds présents dans le réseau.
- 7) **Sécurité physique limitée :** La sécurité revêt une importance accrue dans les réseaux de capteurs sans fil par rapport aux réseaux filaires traditionnels. Cette nécessité est motivée

par des contraintes et des limitations physiques imposées, demandant une réduction maximale du degré de contrôle sur les données transférées [15].

- 8) Environnement :** Les RCSF doivent être construits pour résister aux conditions environnementales difficiles car ils sont fréquemment déployés dans des environnements difficiles.

## 8. Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

Les progrès techniques dans les domaines de l'électronique et des télécommunications contribuent à élargir de manière significative le champ d'application des réseaux de capteurs. Ces avancées comprennent la réduction de la taille et des coûts des capteurs, ainsi que l'expansion des gammes de capteurs disponibles, couvrant des aspects tels que le mouvement, la température, et bien d'autres. De plus, l'évolution des supports de communication sans fil joue un rôle clé dans cette expansion. Ainsi, les applications des réseaux de capteurs s'étendent désormais à des domaines variés tels que la défense, la médecine, l'environnement, le commerce, et bien d'autres.

### 1) Application militaire :

Le déploiement d'un réseau de capteurs dans une zone stratégique ou difficile d'accès offre la possibilité de surveiller de manière exhaustive tous les mouvements, qu'ils soient amis ou ennemis. De plus, cela permet d'analyser le terrain de combat avant d'envoyer des renforts, offrant ainsi une vue détaillée et en temps réel de la situation [19].



**Figure 1.10 :** l'utilisation des RCSF dans le service militaire [7].

### 2) Application médicale :

En médecine, les réseaux de capteurs jouent un rôle crucial en assurant une surveillance continue des organes vitaux du corps humain. Des capteurs miniaturisés, pouvant être avalés ou implantés sous la peau, sont utilisés pour le suivi de la glycémie et la détection des cancers. Ces dispositifs facilitent également le diagnostic de diverses maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que les battements du cœur et la tension artérielle. Chaque capteur a une fonction spécifique, par exemple, de minuscules caméras ingérables permettent de transmettre des images de l'intérieur du corps humain sans nécessiter une intervention chirurgicale [12].



**Figure 1.11** : Exemple d'un système de monitoring cardiaque d'AliveCore avec capteur biométrique et application pour iPhone [14].

### 3) Applications environnementales

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) offrent un large éventail d'applications pour le contrôle des paramètres environnementaux. Par exemple, le déploiement de thermo-capteurs dans une forêt peut détecter précocement les débuts d'incendie, facilitant ainsi une intervention rapide. Dans les milieux urbains, l'utilisation de capteurs chimiques peut contribuer à la détection de la pollution et à l'analyse de la qualité de l'air. De même, le déploiement de capteurs dans les installations industrielles peut prévenir les risques industriels tels que les fuites de produits toxiques tels que les gaz ou les produits chimiques radioactifs. Des nœuds capteurs peuvent également être déployés dans des environnements extrêmes tels que l'espace ou le fond des océans, à partir d'aéronefs, de ballons ou de navires, pour mesurer les paramètres environnementaux et signaler d'éventuels problèmes tels que des pollutions ou des aléas

météorologiques. Ces initiatives visent à améliorer la gestion de ces environnements et renforcer l'efficacité des interventions en cas de problèmes [17].



**Figure 1.12 :** Applications environnementales [19].

#### **4) Applications commerciales**

L'exploitation de nœuds capteurs offre une possibilité d'améliorer les processus de stockage et de livraison. Ce réseau peut être employé pour surveiller en temps réel la position, l'état et la trajectoire d'une marchandise. Ainsi, un client en attente de sa commande peut recevoir des notifications de livraison en temps réel et obtenir des informations sur la localisation précise des articles qu'il a commandés [7].

#### **5) Application à la sécurité**

L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité a le potentiel de significativement réduire les coûts associés à la protection des lieux et des individus. En intégrant des capteurs dans d'importantes infrastructures telles que les ponts ou les bâtiments, il devient possible de détecter rapidement les fissures et les altérations survenues suite à un séisme ou au vieillissement de la structure [18].



Figure 1.13 : Applications à la sécurité de RCSF [19].

## 6) Applications agricoles

Dans le secteur de l'agriculture, l'utilisation de capteurs permet d'ajuster de manière appropriée les pratiques agricoles en réponse aux changements climatiques. Par exemple, les capteurs peuvent être employés pour automatiser le processus d'irrigation dès lors qu'ils détectent des zones sèches dans un champ agricole [17].



Figure 1.14 : Application agricoles de RCSF [19].

## 9. Les systèmes d'exploitation pour les réseaux de capteurs :

Divers systèmes d'exploitation ont été conçus pour répondre aux exigences spécifiques des réseaux de capteurs, parmi lesquels TinyOS est le système le plus connu.

### 9.1. TinyOS :

TinyOS est un système exploitation open source conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il est basé sur une architecture orientée composants qui favorise l'implémentation et l'innovation

rapide. De plus, il génère un noyau de petite taille (quelques ko), comme l'exigent les contraintes de mémoire imposées par les réseaux de capteurs. [20] Ce système d'exploitation est développé avec le langage NesC. Le développement et la maintenance de ce système est maintenant sous la responsabilité d'un consortium international, TinyOS Alliance. [20]

### **9.2. Bluetooth (IEEE 802.15.4) :**

Bluetooth est une spécification de l'industrie des télécommunications. Elle utilise une technique radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Malheureusement, un grand défaut de cette technologie est sa trop grande consommation d'énergie.

### **9.3. Contiki**

Contiki est un système d'exploitation portable, open source et multitâche pour les réseaux de capteurs. Il supporte beaucoup de plateformes et il a un environnement de simulation Netsim.

Ce système a été développé par l'équipe des systèmes embarqués dans l'institut des sciences informatiques suédois. Contiki supporte le multitâche et il implémente la pile protocolaire TCP/IP. Il ne consomme pas beaucoup de mémoire : quelques ko de code et quelques centaines d'octets dans la RAM.

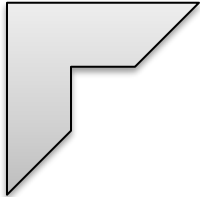
Au contraire de TinyOS qui se base sur la notion d'événements, celui-ci se base sur le multitâche et l'édition statique des liens [20].

## **10. Conclusion**

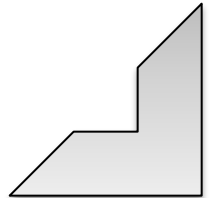
Les réseaux de capteurs sans fil représentent une innovation majeure dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, offrant une diversité d'applications prometteuses dans de nombreux secteurs.

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les caractéristiques fondamentales et l'architecture de ces réseaux, mettant en lumière leur rôle crucial dans la collecte et la transmission de données. L'exploration des diverses applications et topologies a souligné la polyvalence de cette technologie émergente.





**Chapitre 2 :**  
**Les protocoles de routage dans les réseaux de  
capteur sans fil**



## **1. Introduction**

Dans les réseaux sans fil, l'établissement de chemins entre les nœuds pour le transfert de paquets est facilité par l'utilisation de protocoles de routage. Cette fonction est particulièrement cruciale dans les réseaux de capteurs, où les protocoles de routage sont responsables de la création de chemins entre n'importe quel nœud du réseau et la station de base, assurant ainsi une précision optimale du routage. Les directives relatives aux réseaux de capteurs sans fil (RCSF) doivent prendre en considération deux limitations fondamentales. En premier lieu, elles doivent permettre le transfert rapide des informations du nœud à la station de base en utilisant le chemin le plus direct. En second lieu, elles doivent assurer la transmission de ces informations à la station de base avec une consommation d'énergie minimale.

Ce chapitre offre une vue d'ensemble des RCSF. Le point de départ consiste à définir le routage et les protocoles associés, puis à effectuer une classification de ces protocoles.

## **2. Définition de routage**

Le routage fait référence au processus de transmission de données entre des réseaux informatiques distincts. Il consiste à déterminer la meilleure voie pour acheminer les paquets de données d'un point d'origine à une destination à travers un réseau interconnecté. Le dispositif responsable de cette prise de décision est généralement un routeur. Le routage repose sur des protocoles de routage qui définissent les règles et les algorithmes permettant aux routeurs de choisir le chemin optimal pour transmettre les données [21].

## **3. Protocole de routage**

Le protocole de routage est un système distribué conçu pour identifier le chemin optimal permettant le transfert efficace de données entre deux nœuds, à savoir la source et la destination, au sein d'un réseau [22].

### **3.1. L'objectif de protocole de routage**

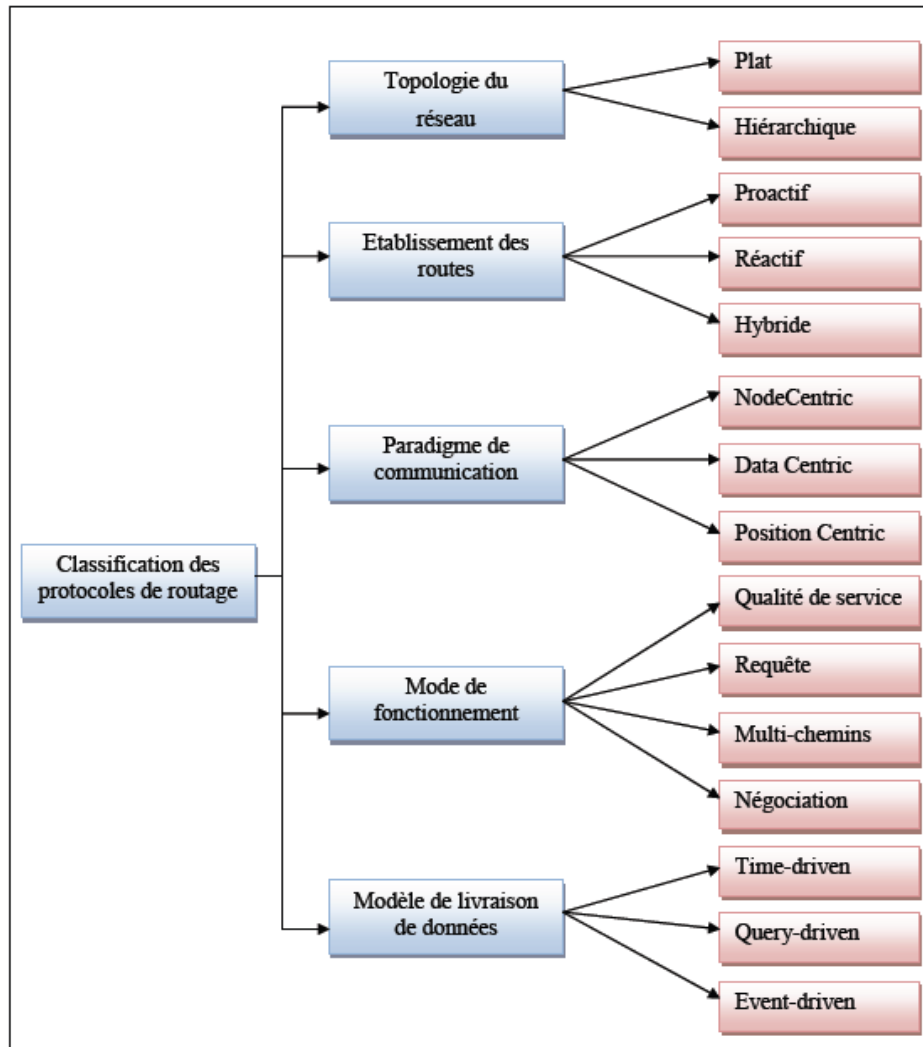
Dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), les protocoles de routage sont conçus pour répondre à des besoins spécifiques liés aux caractéristiques particulières de ces réseaux. Les

objectifs principaux des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil incluent généralement [23] :

- **Économie d'énergie** : Les capteurs sans fil sont généralement alimentés par des batteries et ont des ressources énergétiques limitées. Les protocoles de routage visent à minimiser la consommation d'énergie des capteurs en optimisant les chemins de transmission et en utilisant des stratégies d'économie d'énergie.
- **Évolutivité** : Les réseaux de capteurs peuvent comprendre un grand nombre de nœuds. Les protocoles de routage cherchent à être évolutifs, c'est-à-dire qu'ils doivent maintenir des performances acceptables même lorsque le nombre de capteurs dans le réseau augmente.
- **Adaptabilité à la topologie dynamique** : Les réseaux de capteurs sans fil peuvent avoir une topologie qui change fréquemment en raison de la mobilité des capteurs ou d'autres facteurs. Les protocoles de routage doivent être capables de s'adapter à ces changements de manière efficace.
- **Latence réduite** : Certaines applications de réseaux de capteurs nécessitent des temps de réponse rapides. Les protocoles de routage cherchent à minimiser la latence de transmission des données.
- **Fiabilité** : Les protocoles doivent garantir que les données sont acheminées de manière fiable malgré les contraintes du réseau, telles que la perte de paquets ou les erreurs de transmission.

#### **4. Classification des protocoles de routage dans RCFS**

Récemment, une attention considérable a été accordée à la recherche sur les protocoles de routage dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Leur classification peut être effectuée en fonction de divers critères, comme le montre **la figure 2.1**:



**Figure 2.1:** Classification des protocoles de routage dans les RCSF [23].

#### **4.1. Selon la topologie du réseau**

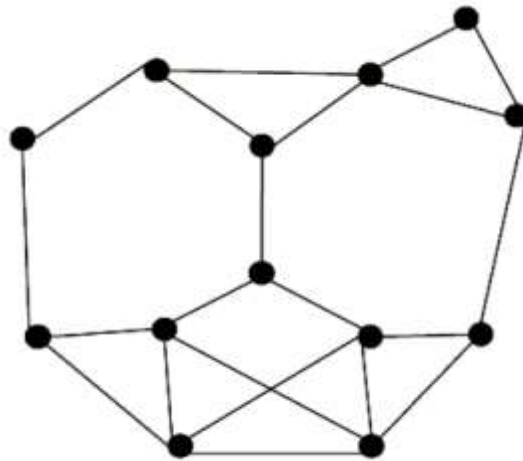
Dans un Réseau de Capteurs sans Fil (RCSF), la topologie guide l'arrangement logique des capteurs, ajusté par les protocoles de routage, pour faciliter la réalisation des diverses opérations telles que la découverte de routes et la transmission de données. Globalement, il existe deux topologies : La topologie plate et la topologie hiérarchique [24].

##### **4.1.1. Protocoles de routage plats**

Dans une topologie plate, tous les nœuds du réseau sont considérés au même niveau et contribuent de manière égale au routage des données. Ils peuvent soit collaborer dans un routage multi-sauts, soit laisser la responsabilité de la collecte des données uniquement au nœud puits.

Cette configuration est connue pour la simplicité des algorithmes utilisés par les protocoles de routage. Cependant, il est important de noter que les nœuds situés près de la station de base jouent un rôle plus important dans le routage, ce qui peut entraîner une utilisation plus intensive de leurs ressources énergétiques et potentiellement une dégradation des performances du réseau [25].

Plusieurs protocoles, tels que SPIN, Directed diffusion, Rumor Routing, CADR, etc., sont classés dans cette catégorie.



**Figure 2.2 :** Topologie plate [22].

➤ **Le protocole DD (Directed Diffusion)**

Directed Diffusion est un protocole de routage de propagation de données, permettant d'utiliser plusieurs chemins. DD est basé sur le principe de fonctionnement suivant : c'est la station de base qui diffuse un message d'intérêt à tous les nœuds capteurs afin d'interroger le réseau sur une donnée bien déterminée. Cette demande est acquittée par un paquet de réponse appelé gradient qui est un lien de réponse de la part du nœud. Ainsi, en utilisant ce mécanisme, une multitude de chemins peuvent être établis entre une source donnée et la station de base. L'un des chemins est alors sélectionné par renforcement et si ce dernier échoue, alors un autre chemin doit être établi. Dans le cas d'une panne d'un chemin (perte de paquet, débit réduit, etc.), alors la station de base peut envoyer un renforcement négatif sur le chemin en panne en spécifiant le débit de base et en prenant comme alternative le renforcement positif d'un autre chemin [26].

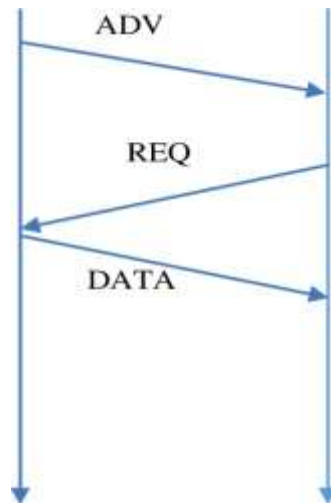
➤ **Le protocole SPIN**

Heinzelman et al. [27] ont proposé une famille de protocoles appelée SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), reposant sur un modèle de négociation afin de propager l'information dans un réseau de capteurs. Le but de SPIN est de pallier aux problèmes de l'inondation, qui sont :

- L'implosion due à la duplication inutile des réceptions d'un même message.
- Le chevauchement lié au déploiement dense des capteurs. En utilisant l'inondation, les capteurs d'une zone émettront tous la même donnée (ou presque).
- L'ignorance des ressources, car d'inondation ne prend pas en considération les ressources des nœuds.

Ces trois problèmes affectent grandement la durée de vie et les performances du réseau. Pour les résoudre, SPIN adopte deux principes [28] :

- ✓ **La négociation** : pour éviter le problème d'implosion, SPIN précède l'émission d'une donnée par sa description, en utilisant la notion de méta-données. Le récepteur aura le choix par la suite d'accepter la donnée ou non. Ce mécanisme permet aussi de régler le problème de chevauchement.
- ✓ **L'adaptation aux ressources** : d'une manière continue, les nœuds contrôlent leur niveau d'énergie. Le protocole SPIN accommode son exécution suivant l'énergie restante du capteur, et modifie en conséquence le comportement du nœud.



**Figure 2.3 :** SPIN Protocole

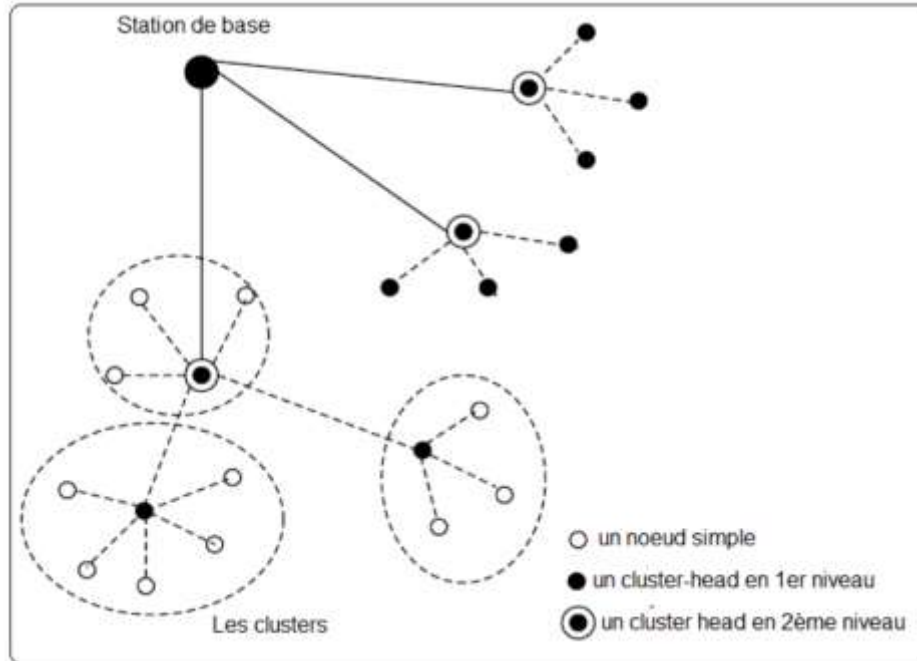
Les communications dans SPIN se font en trois étapes [29] :

- Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.
- En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA

#### **4.1.2. Protocoles de routages hiérarchiques**

Dans une configuration hiérarchique, les nœuds jouent des rôles distincts, certains étant plus puissants que d'autres et étant choisis pour des fonctions spécifiques. Une approche courante dans cette topologie est le clustering, qui consiste à diviser le réseau en groupes appelés clusters. Chaque cluster est composé de ses membres et d'un leader appelé "cluster-head" chargé de coordonner les activités au sein du cluster et de transmettre les informations entre les clusters en direction de la station de base [25]. Cette approche présente des avantages tels que la scalabilité et une utilisation efficace de l'énergie.

Parmi les protocoles classés dans cette catégorie LEACH, PEGSIS, MECN, et TEEN.



**Figure 2.4 :** Topologie hiérarchique [30].

➤ **Le protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)**

Ce protocole est proposé par W. R. Heinzelman et al qui minimise la dissipation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Il est basé sur un mécanisme de clustering simple par lequel l'énergie peut être conservée puisque les têtes de cluster sont sélectionnées pour la transmission de données au lieu d'autres noeuds [31].

Le fonctionnement de LEACH est divisé en tours, Le protocole se déroule en rounds. Chaque round se compose de deux phases : construction et communication.

- **Phase de construction :** Le but de cette phase est la construction des clusters en choisissant les chefs et en établissant la politique d'accès au média au sein de chaque groupe. Cette phase commence par la prise de décision locale pour devenir cluster-head. Chaque noeud  $n$  choisit un nombre aléatoire, si ce nombre est inférieur à une valeur  $T(n)$ , le noeud devient cluster-head.  $T(n)$  est défini comme suit [26]:

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

Avec :

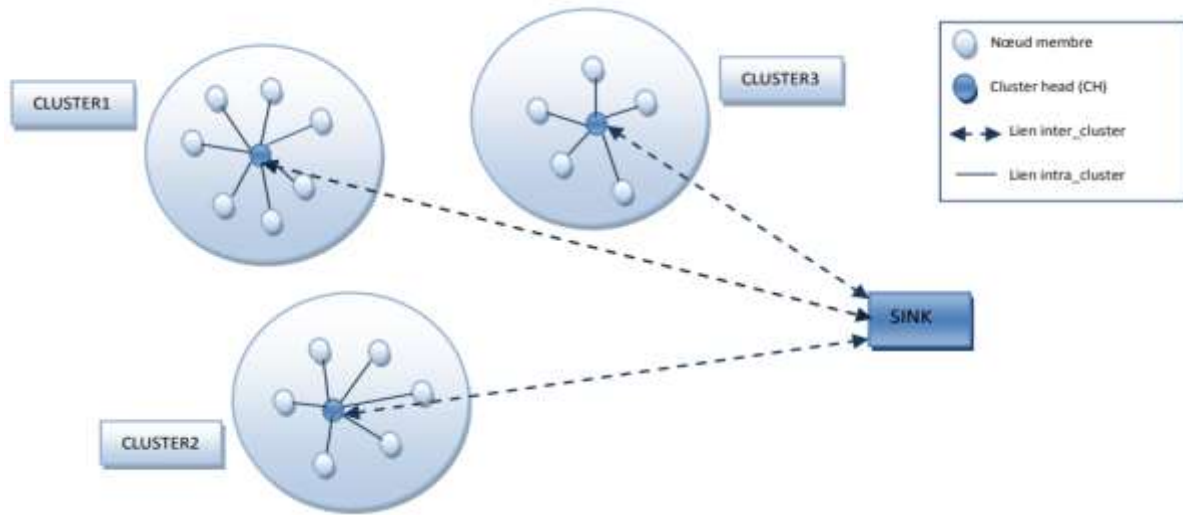
**P** : pourcentage des nœuds désirant devenir cluster-head.

**r** : numéro du round courant.

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

Par la suite, chaque nœud qui s'est élu cluster-head émet un message de notification. Les nœuds membres récoltent les messages de notification, et décident leur appartenance à un cluster. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu : le cluster-head ayant le signal le plus fort est choisi (i.e. le plus proche). En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision. Toutes les communications précédentes étant faite dans une topologie plate, la méthode CSMA doit être employée. Par la suite, les communications au sein d'un cluster peuvent être faites avec la méthode TDMA. Pour cela, chaque chef établie un Schedule TDMA pour ses membres, en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission. Ce Schedule est envoyé aux membres [31].

- **Phase de communication** : En utilisant le schedule TDMA, les membres émettent leurs données captées pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots réservés, afin d'économiser leur énergie. Ces informations sont ensuite agrégées, pour être transmises au collecteur (sink). Cette communication, entre un cluster-head et le collecteur, se fait d'une manière directe, i.e. : le cluster-head adapte son émetteur radio afin d'atteindre directement le collecteur [31].

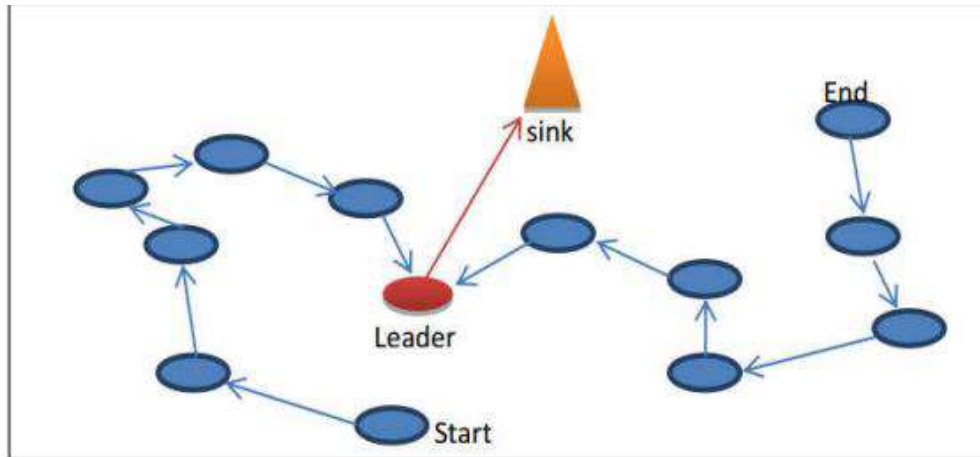


**Figure 2.5:** Paradigme de routage dans LEACH [27].

➤ **Le protocole PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)**

Power-Efficient Gathering in Sensor Information System (PEGASIS) [8] est une version améliorée du protocole LEACH. PEGASIS forme des chaînes plutôt que des clusters de noeuds de capteurs afin que chaque nœud transmette et reçoive uniquement des données d'un voisin. Un seul nœud est sélectionné à partir de cette chaîne pour transmettre à la station de base [26].

L'idée de PEGASIS est qu'il utilise tous les noeuds pour transmettre ou recevoir des données avec ses plus proches voisins. Il déplace les données reçues de nœud à nœud, puis les données seront agrégées jusqu'à ce qu'elles atteignent tous la station de base. Donc, chaque nœud du réseau est tour à tour un chef de file de la chaîne, ainsi que responsable pour transmettre l'ensemble des données recueillies et fusionnées par la chaîne de noeuds au niveau de la station de base [26].



**Figure 2.6 :** Le protocole PEGASIS.

## **4.2. Selon l'établissement des chemins**

Selon la manière dont les chemins sont établis et maintenus pendant le routage, on peut classer les protocoles en trois catégories : les protocoles proactifs, réactifs et hybrides.

### **4.2.1. Les protocoles proactifs**

Les protocoles proactifs effectuent un calcul de toutes les routes possibles avant d'effectuer le routage. Les nœuds maintiennent une information sur la topologie du réseau sous forme de tables de routage, et ce, de façon périodique ou suite à un évènement. Ce genre de protocoles consomme beaucoup de ressources du réseau, du fait de la connaissance préalable de la topologie. Il existe plusieurs protocoles proactifs, tels que, le TBRPF, DSDV et le HSR [32].

#### **➤ Le protocole de routage « DSDV »**

Destination Sequence Distance Vector (DSDV) est un protocole proactif unicast mobile ad hoc qui est basé sur l'algorithme de Bellman-Ford. Dans les tables de routage de DSDV on trouve [33]:

- Toutes les destinations possibles.
- Le nombre de nœuds (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination.
- Le numéro de séquences (SN : sequence number) qui correspond à un nœud destination.

Les numéros de séquence sont utilisés dans DSDV pour distinguer les anciennes et nouvelles routes et pour éviter la formation de boucles de parcours. Chaque nœud transmet périodiquement des mises à jour, y compris des informations de routage à ses voisins immédiats.

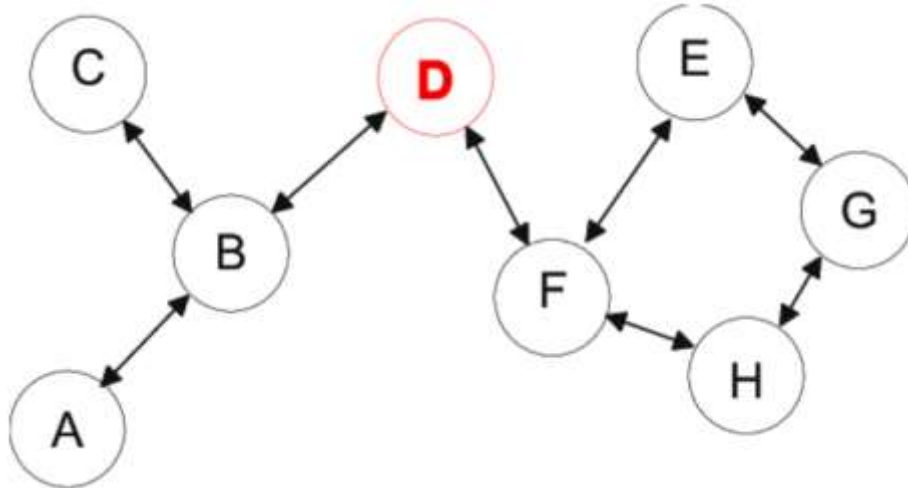


Figure 2.7 : Exemple de réseau utilisant le protocole DSDV.

### ❖ **Avantage et inconvénients du protocoles DSDV**

#### **a. Avantages de DSDV**

- Réduction du trafic grâce aux mises à jour incrémentielles, évitant ainsi une surcharge du réseau.
- Garantie de parcours sans boucles, assurant une fiabilité dans la transmission des données.
- Simplification de la table de routage en ne conservant pas la trace des multiples chemins vers la destination.

#### **b. Inconvénients de DSDV**

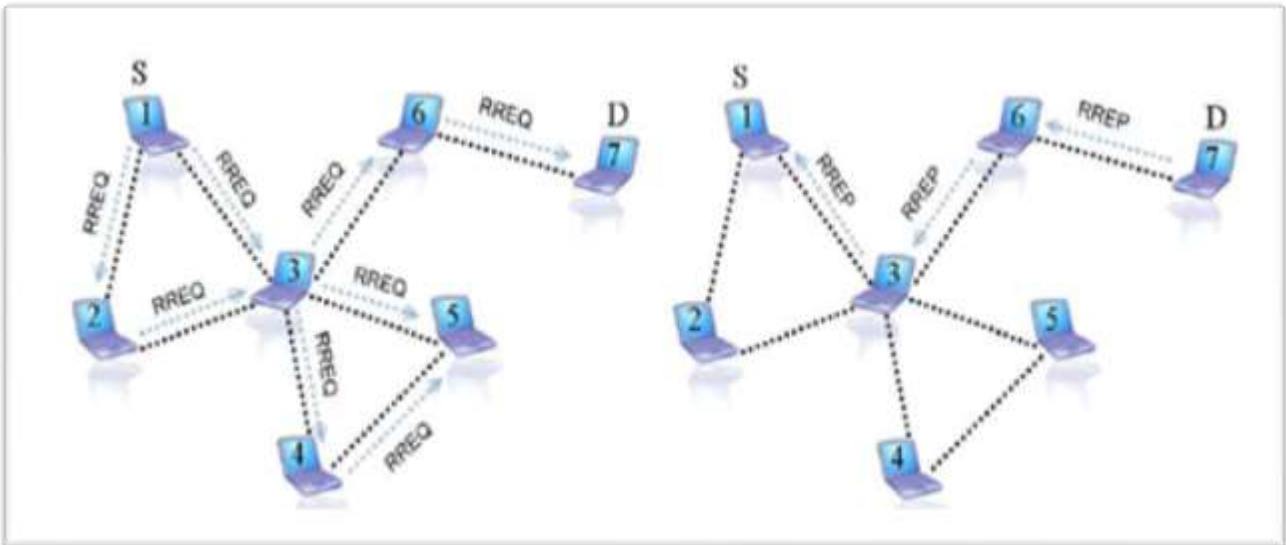
- Difficulté de maintenance d'une table de routage pour des réseaux de plus grande envergure.
- Gaspillage de la largeur de bande en raison d'une diffusion inutile d'informations de chemin.
- Épuisement rapide de la batterie en raison des mises à jour fréquentes des tables de routage exigées par DSDV.

#### 4.2.2. Les protocoles réactifs

Ce sont des protocoles qui calculent la route sur demande avant d'effectuer le routage et n'ont pas besoin de connaître la topologie du réseau ou d'échanger périodiquement des informations sur le routage. L'aspect « sur demande » du routage élimine la nécessité de mettre à jour la route, mais augmente le délai de démarrage du routage à cause du temps de découverte de la route. Plusieurs protocoles ont été développés dans cette catégorie, on peut citer l'AODV, le DSR, TORA [32].

##### ➤ Le protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

C'est un protocole à vecteur de distance, comme DSDV, mais il est réactif plutôt que proactif comme DSDV. En effet, AODV ne demande une route que lorsqu'il en a besoin. AODV utilise les numéros de séquence d'une façon similaire à DSDV pour éviter les boucles de routage et pour indiquer la « nouveauté » des routes. Une entrée de la table de routage contient essentiellement l'adresse de la destination, l'adresse du nœud suivant, la distance en nombre de sauts (i.e. le nombre des nœuds nécessaires pour atteindre la destination), le numéro de séquence destination, le temps d'expiration de chaque entrée dans la table [33]



**Figure 2.8 :** Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV [31]

**La figure 2.8** illustre le mécanisme de création des routes d'AODV. Il y a d'abord diffusion de la demande de route. Ensuite, la destination envoie une réponse, qui, grâce aux informations

recueillies par les nœuds lors de la diffusion de la demande de route, crée une route de la destination vers la source.

A noter que le protocole de routage AODV n'assure pas la détection du meilleur chemin existant entre la source et la destination. Les nœuds voisins sont détectés par des messages périodiques HELLO (un message particulier de RREP). Si un nœud  $x$  ne reçoit pas un message HELLO d'un voisin  $y$  par lequel il envoie des données, ce lien est considéré brisé et une indication de défaillance de lien est envoyée à ses voisins actifs. Ces derniers propagent l'indication à leurs voisins qui utilisaient le lien entre  $x$  et  $y$ . Lorsque le message du lien brisé atteint finalement les sources affectées, celles-ci peuvent choisir d'arrêter l'envoi des données ou de demander une nouvelle route en envoyant un nouveau message RREQ [28].

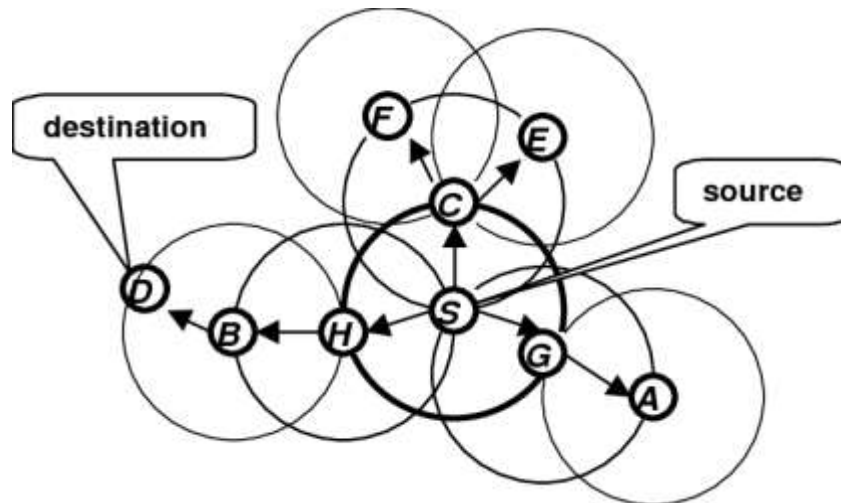
### **4.2.3. Les protocoles hybrides**

Les protocoles hybrides intègrent les principes des protocoles proactifs et réactifs. Ils adoptent un protocole proactif pour obtenir des informations sur les voisins les plus proches, généralement dans une zone prédéfinie allant jusqu'à deux sauts. Au-delà de cette zone, les protocoles hybrides font appel aux méthodes des protocoles réactifs pour rechercher des routes. En résumé, ils combinent les avantages des deux approches pour optimiser l'efficacité du routage [35]

#### **➤ Le protocole ZRP (Zone Routing Protocol)**

Afin d'obtenir le meilleur des deux protocoles, ZRP est un exemple de protocole hybride qui combine des tactiques proactives et réactives [34].

Le réseau est divisé en différentes zones par le protocole ZRP, chacune pouvant avoir une taille variée. En fait, il établit une zone de routage avec un nombre de sauts maximum de  $S$  pour chaque nœud  $S$ . En conséquence, tous les nœuds qui sont au moins à des sauts de  $S$  sont inclus dans la zone de routage de  $S$ . Les nœuds périphériques sont ceux qui sont précisément à des sauts de  $S$ . En dehors de sa région de routage, ZRP utilise son protocole réactif alors qu'à l'intérieur de cette zone, il utilise son protocole proactif [34].



**Figure 2.9 :** Exemple de fonctionnement du protocole ZRP.

### 4.3. Selon le paradigme de communication

Le paradigme de communication détermine la manière dont les nœuds sont interrogés. Dans les RCSFs, il existe trois paradigmes de communication [36]

#### a. Centré-nœuds

Ce paradigme est celui employé dans les réseaux conventionnels, où il est nécessaire de connaître et d'identifier les nœuds communicants comme les adresses MAC ou IP. Ce paradigme reste toujours performant dans le cas des réseaux de petite taille et nécessitent une interrogation individuelle des capteurs. Les protocoles LEACH et PEDAP sont parmi les protocoles classés dans cette catégorie [25].

#### b. Centré-données

Ce modèle est employé dans des réseaux dépourvus d'un système d'identification globale, tels que les RCSF. En effet, les communications sont distinguées par leurs données, ce qui implique que l'interrogation et le routage doivent être régis par cette caractéristique spécifique. Ainsi, cette catégorie de protocole englobe ceux qui adoptent une approche de dissémination de requêtes centrée sur les données au sein du réseau. Ces méthodes reposent sur une identification basée sur les attributs, où un nœud source est doté d'un attribut lié au phénomène perçu, au lieu d'utiliser des identificateurs individuels. La dissémination des requêtes s'effectue en déléguant des tâches aux nœuds capteurs et en élaborant des requêtes

en fonction d'attributs spécifiques [36]. Parmi les protocoles centrés sur les données, on retrouve le protocole Directed Diffusion et SPIN.

### **c. Centré localisation**

Ce modèle est appliqué dans des contextes où il est plus avantageux d'interroger le système en se fondant sur la localisation des nœuds, et où l'exploitation des positions des nœuds permet de prendre des décisions visant à minimiser le nombre de messages transmis pendant le routage. Toutefois, l'implémentation de tels mécanismes requiert la mise en place d'une solution de positionnement, dont la précision nécessaire dépend de l'application spécifique. Une approche simple consiste à utiliser un système de localisation global comme le GPS, mais ce type de système demeure souvent trop coûteux pour un RCSF. Malgré cela, diverses méthodes de localisation et de positionnement des capteurs ont été développées, telles que la triangulation et la localisation par centroïdes. Des exemples de protocoles orientés vers la localisation incluent GAF et GEAR [25].

#### ➤ **Le protocole de routage « GAF »**

GAF (Geographic Adaptive Fidelity) représente un protocole de routage qui se base sur la localisation des nœuds. Bien qu'il soit principalement conçu pour les réseaux mobiles ad hoc, il peut également être adapté aux réseaux de capteurs. La localisation des nœuds dans GAF peut être obtenue à l'aide de diverses techniques, notamment le GPS ou d'autres méthodes de localisation [37].

Ce protocole fonctionne en formant des grilles virtuelles de la zone concernée, partitionnant ainsi l'espace où les nœuds sont déployés en petites zones. Par exemple, pour deux grilles adjacentes  $G_x$  et  $G_y$ , tous les nœuds de  $G_x$  peuvent communiquer avec tous les nœuds de  $G_y$ . Ce système de partitionnement garantit la fidélité du routage, car il assure qu'au moins un chemin existe entre un nœud et la station de base. GAF a le potentiel d'augmenter significativement la durée de vie du réseau en permettant qu'un seul nœud dans chaque grille reste actif, tandis que les autres nœuds passent en mode sommeil pendant une période donnée, tout en assurant la continuité du routage [37].

Cependant, dans des environnements où les nœuds sont fortement mobiles, la fidélité du routage peut être compromise si un nœud actif quitte la grille. Dans de telles circonstances, le risque de perte de données devient important.

#### **4.4. Selon le mode de fonctionnement du protocole**

Le mode de fonctionnement définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau. Selon ce critère, les protocoles de routage peuvent être classifiés en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (*Quality of Service "QoS" based routing*), routage basé sur les requêtes (query-based routing), routage multi-chemins (Multi-path routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing).

##### **1) Routage basé sur les multi-chemins**

Au sein de cette catégorie, les protocoles de routage optent pour la diversification des itinéraires plutôt que de se restreindre à une seule voie, dans le but d'optimiser les performances du réseau. L'évaluation de la fiabilité d'un protocole repose sur sa capacité à détecter des chemins de secours entre la source et la destination en cas de dysfonctionnement de la voie principale. Ainsi, certains protocoles érigent plusieurs parcours indépendants, limitant strictement, voire éliminant, le partage de nœuds. En dépit de leur remarquable résistance aux pannes, ces protocoles requièrent une consommation énergétique plus élevée et génèrent un nombre substantiel de messages de contrôle. [30] Parmi les protocoles qui utilisent les chemins multiples, le protocole Directed Diffusion.

##### **2) Routage basé sur les requêtes**

Dans ce type de routage, le point de collecte émet des demandes pour interroger les capteurs. Ces requêtes sont formulées soit selon un schéma de valeur-attribut, soit en utilisant un langage dédié (par exemple, le langage SQL - Structured Query Language). Les nœuds détenant les données requises sont tenus de les transmettre au nœud demandeur en empruntant le chemin inverse de la requête. Les demandes émises par le point de collecte peuvent également être ciblées sur des zones spécifiques du réseau. Les deux protocoles : Directed Diffusion et Rumour Routing se basent sur ce principe. [30]

### **3) Routage basé sur la négociation**

Dans cette catégorie, les protocoles reposent sur des mécanismes de négociation et font usage de descripteurs de données de haut niveau, également appelés métadonnées, pour décrire les informations avant de les transmettre. Ainsi, le destinataire potentiel a la possibilité de décider d'accepter ou de refuser la réception du paquet. Cette approche garantit que seules les données pertinentes sont transmises, éliminant ainsi toute redondance. Un exemple de protocole appartenant à cette classe est le protocole SPIN, qui se caractérise par son fondement sur la négociation dans le processus de routage des données. Le protocole SPIN appartient à la classe des protocoles de routage basés sur la négociation. [25]

### **4) Routage basé sur la qualité de service**

Dans les protocoles de routage basés sur QoS, le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple, la latence, la consommation de l'énergie, largeur de bande passante, etc. Les protocoles de cette approche sont très recommandés pour les applications orientées surveillance, Le protocole SPEED et SAR sont les premiers protocoles géographiques basé sur la qualité de service. [27]

#### **➤ Le protocole SPEED**

Le protocole SPEED, appliqué dans les réseaux de capteurs sans fil, requiert que chaque nœud conserve des informations sur ses voisins et utilise une approche de transmission basée sur la géographie pour déterminer les chemins de communication. De plus, SPEED s'engage à maintenir une certaine vitesse pour chaque paquet circulant dans le réseau, permettant ainsi à chaque application d'estimer le délai bout à bout pour les paquets. Cette estimation est obtenue en divisant la distance jusqu'au point central (Sink) par la vitesse du paquet, avant de prendre toute décision d'admission [38].

L'objectif de SPEED est d'anticiper la congestion lorsque le réseau est soumis à une charge élevée. En effet, en maintenant un contrôle sur la vitesse des paquets, le protocole peut contribuer à éviter des situations de congestion dans le réseau sans fil de capteurs.

➤ **Le protocole SAR (Sequential Assignment Routing)**

SAR [26] est l'un des premiers protocoles de routage pour les RCSFs qui introduit la notion de qualité de service (QoS) dans les décisions de routage []. SAR est une approche multi-chemins qui s'efforce à réaliser l'efficacité énergétique et la tolérance aux fautes.

Pour cela, SAR crée des arbres en prenant en compte les trois facteurs : métriques QoS, la ressource énergétique sur chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet. En utilisant ces arbres, des routes multiples du *sink* aux capteurs sont formées. Une ou plusieurs routes peuvent alors être empruntées. Pour assurer la tolérance aux pannes, SAR recalcule périodiquement les routes à choisir en cas de défaillance d'un nœud ou de changement de topologie.

#### **4.5. Selon le type d'application**

La méthode de captage des données dans un RCSF dépend de l'application et de l'importance de la donnée. De ce fait, les RCSF peuvent être catégorisés comme time-driven ou event-driven [39].

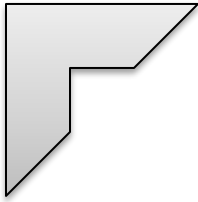
- **Application time-driven** : un réseau time-driven est approprié pour des applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données. Par exemple, cela est utile dans des applications de monitoring (feu, météo) afin d'établir des rapports périodiques.
- **Application event-driven** : dans des applications temps réel, les capteurs doivent réagir immédiatement à des changements soudains des valeurs captées. Un prélèvement périodique des données est inadapté pour ce type de scénarios. Pour cela, le protocole doit être réactif et doit donner des réponses rapides à l'occurrence d'un certain nombre d'évènements.

## **5. Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a exploré en détail les protocoles de routage dans les réseaux de capteur sans fil. Nous avons examiné l'importance cruciale de ces protocoles pour établir des chemins efficaces entre les nœuds et assurer un transfert optimal des données, en mettant

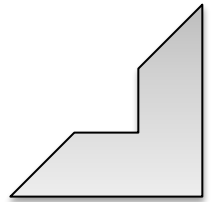
particulièrement l'accent sur la rapidité et l'économie d'énergie. La classification des protocoles a permis de mieux comprendre la diversité des approches utilisées dans ce domaine.

Nous avons mis l'accent sur les principaux protocoles de routage dans les réseaux de capteur sans fil. Nous avons résumé les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs et classé les approches en cinq catégories principales : selon la structure du réseau, selon le type d'application, selon le fonctionnement du protocole, selon l'établissement du chemin et selon le paradigme de communication.



## ***Chapitre 3 :***

# ***La simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil***



## **1. Introduction**

La simulation est un outil essentiel pour l'étude et le développement des protocoles de routage dans les RCSF. Elle permet de modéliser le comportement du réseau sous différentes conditions et de tester l'efficacité des protocoles sans avoir besoin de déployer un réseau réel. Dans le but de proposer de nouveaux protocoles de routage de données entre nœuds capteurs, prenant en compte tout ou partie des leurs différents aspects (énergétique, comportemental,...) , il est nécessaire de simuler leur comportement et de comparer leurs résultats avec ceux obtenus à l'aide d'autres protocoles existants. Pour cela, il existe plusieurs plateformes de simulation dont certaines sont en accès libre et d'autres propriétaires. Ce chapitre passe en revue plusieurs de ces outils parmi les plus utilisés dans la littérature puis propose les principes de base de la simulation utilisant l'environnement MATLAB.

## **2. La modélisation/simulation dans les RCSFs**

L'étape de modélisation d'un système est une action prioritaire qui consiste dans la construction d'un prototype concret, abstrait ou virtuel représentant fidèlement le système ou quelques-unes de ses parties. Ce prototype sera utilisé dans le cadre de la conception, de l'amélioration des performances ou dans un cadre purement pédagogique à des fins d'entraînement, d'assistance ou d'enseignement/présentation. Ainsi, au-delà du fait de retombées économiques en gain de coûts, on peut souligner l'apport tant en sécurité qu'en clarté d'une telle entreprise. La simulation consiste, elle, dans la soumission du modèle obtenu à un ensemble de cas de tests dont le but est d'analyser les comportements et réactions de ce modèle lorsqu'il est soumis à ces données de tests pour en tirer des conclusions. Il s'en dégage, ainsi, plusieurs théories concernant la modélisation simulation.

Pour analyser les performances des réseaux sans fil ainsi que des réseaux câblés, trois techniques principales peuvent être utilisées : les méthodes analytiques (mathématiques), les mesures au banc d'essai ou mesures physiques et la simulation par ordinateur .

Dans les méthodes mathématiques, il s'agit de représenter le réseau par des ensembles d'équations et de fonctions mathématiques en fixant un ensemble de conditions initiales ainsi qu'un ensemble de paramètres. Il s'agit, cependant, de méthodes qui sont parfois très complexes

### Chapitre 3 : La simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

et qui nécessitent des équations comportant, le plus souvent, de nombreux facteurs et dont la complexité peut devenir très vite non maîtrisable. La résolution de ces équations pour des jeux de données réels ou abstraits permet de prédire ou de représenter l'évolution du système. Il s'agit, très souvent, d'équations différentielles, dont les paramètres sont souvent simplifiés et optimisés pour maîtriser la complexité de résolution. De plus, il existe un fossé sémantique qui peut être, souvent, non négligeable entre le phénomène à modéliser et le système d'équation censé le représenter. L'utilisation et la manipulation d'un tel système d'équation sont, ainsi, une affaire de spécialiste. Dans cet ordre d'idée ; on peut citer la forme la plus basique de modélisation/simulation qui consiste à se faire une 'idée mentale' du système concerné et d'en faire des projections qui constituent, en quelque sorte, des plans mentaux d'expérimentation. C'est une forme mentale et intuitive qui constitue, certainement, la forme la plus utilisée et celle qui présente un coût nul. En extrapolant un peu sur ce domaine ; tout système provient de quelques idées de base qui en constituent l'essence même. Pour ne pas dire que toute modélisation/simulation a pour origine une abstraction mentale du phénomène à simuler.

La construction pratique de bancs d'essais ou de prototypes (maquettes) pour représenter un phénomène dans le but de le modéliser compte parmi les méthodes assez simplistes mais les plus chères à mettre en œuvre. Le but est de construire une représentation pratique du phénomène puis d'agir sur cette maquette pour en tirer des conclusions (exemple : construction d'un prototype de réseaux de capteurs sans fil, et le faire évoluer en changeant un ensemble de conditions telles que simulation d'envois de paquets, vérification de la robustesse du réseau, changement de protocoles de routage, ...). Par conséquent, cette deuxième alternative peut être vue comme constituant un modèle complet pour les réseaux ad hoc sans fil et présente des intérêts non négligeables du point de vue clarté de représentation. Cependant, d'une part la construction d'un banc d'essai pour tout réseau prédéfini est une tâche très coûteuse, souvent insupportable et nécessitant beaucoup d'efforts, de plus il y'a un problème de passage à l'échelle qui se pose et on pourrait difficilement prévoir ce qui adviendrait au système dans ce genre de situation.

De nos jours, la simulation par ordinateur est la méthode qui s'impose de plus en plus en s'avérant être un outil précieux pour développer et tester de nouveaux protocoles pour les réseaux de capteurs sans fil. Cette méthode est nettement moins onéreuse que les bancs d'essai et

plus souple et moins complexe que la simulation analytique. Parmi ses intérêts majeurs, il y'a le fait qu'il est possible d'effectuer la simulation en considérant une très large gamme de situations et de jeux d'essais. Cette technique peut être appliquée là où les méthodes analytiques ne sont ni applicables ni faisables. Les chercheurs utilisent couramment la méthode de simulation informatique pour analyser les performances d'un système. Ces simulateurs sont utilisés pour de nombreuses raisons telles que la réduction des coûts, la facilité de mise en œuvre et l'aspect pratique des tests de réseaux à grande échelle.

L'objectif principal des simulateurs est d'atteindre une situation "aussi réelle que possible" afin de rendre le résultat obtenu réaliste et adaptable. Dans la simulation de réseaux de capteurs sans fil, trois points importants doivent être pris en compte ; premièrement, les protocoles et les algorithmes doivent être exempts d'erreurs et avoir été mis en œuvre dans les détails, deuxièmement, l'environnement de simulation doit être réaliste et en plus de cela, une véritable méthode est utilisée pour analyser les données collectées. Cependant, il existe encore plusieurs pièges potentiels. Pour les surmonter, il est nécessaire de connaître les différents outils disponibles et de connaître leurs avantages et leurs inconvénients.

### **2.1. Aspects liés à la simulation**

Plusieurs aspects sont liés à la notion de simulation, nous présentons ci-dessous quelques-uns loin d'être exhaustif :

#### **a. La simulation stochastique :**

La simulation stochastique est l'un des outils de simulation les plus réalistes qui inclue un certain caractère aléatoire ainsi que des éléments qui s'écoulent dans le temps. Les principales applications de telles simulations ont pour but de proposer un modèle d'observation du trafic dans un réseau particulier, des centres de service client, et bien d'autres.

#### **b. La simulation déterministe**

Dans le cadre de la simulation déterministe des valeurs fixes et non aléatoires sont utilisées pour définir le modèle du système étudié. La sortie du système est fixée en fonction de certaines entrées spécifiques en raison de l'absence de caractère aléatoire.

**c. La simulation dynamique**

Les modèles de simulation dynamique sont des modèles qui entraînent des changements dans le système lorsque les signaux d'entrée changent. Le processus de simulation est évolutif et change dans le temps .

**d. La simulation à événements discrets**

Les modèles de simulation à événements discrets sont des modèles qui organisent les événements sur une base temporelle. Dans ce type de simulations, une file d'attente d'événements est créée par le simulateur sur la base du temps dans lequel ils se produisent. Ensuite, le simulateur lit la file d'attente d'événements et un nouvel événement est entré au fur et à mesure que le précédent est exécuté. La plupart des outils de simulation relèvent de cette catégorie, comme les ordinateurs, les simulateurs d'arbre de défaillances et de tests logiques. Les simulateurs basés sur des agents sont un cas particulier de ce simulateur dans lequel les entités mobiles sont appelées agents. Cependant, dans le cas d'un modèle à événements discrets traditionnel, les entités n'ont que des attributs mais les agents sont dotés d'attributs et de rôles ou services analogues aux méthodes qui incluent des règles d'interaction avec d'autres agents. Les modèles de simulation à événements discrets sont de loin ceux qui ont donné lieu à la conception et à l'implémentation d'approches et de plateformes de modélisation simulation, notamment dans le cas de simulateurs pour les réseaux de capteurs sans fil (NS2, NS3,...) ainsi que pour les d'autres types de simulateurs pour l'IoT (Sehili, 2018), les CPs et autres technologies émergentes.

**e. La simulation continue**

Les simulateurs continus sont de nature opposée aux simulateurs discrets. Dans ce cas de figure, la simulation prend en considération une base de temps continue où l'évolution du phénomène simulé est considérée de façon ininterrompue. Il s'agit, le plus souvent, de résoudre des systèmes d'équations différentielles qui montrent l'évolution du système. Ce type de simulation fonctionne en continu plutôt que par étapes discrètes.

**f. La simulation hybride**

Dans le cas de la simulation hybride, les outils utilisés combinent à la fois les caractéristiques des simulateurs continus avec celles des simulateurs discrets.

**g. La simulation parallèle et distribuée**

La modélisation parallèle et distribuée considère un ensemble de modèles répartis sur un ensemble de sites qui sont simulés de façon concurrente. Une utilisation optimale de ce genre de simulation utilise des réseaux interconnectés, l'exécution se faisant sur un ensemble de machines interconnectées.

**2.2. Intérêts de la Modélisation/Simulation**

La modélisation/simulation est très employée dans les systèmes et les procédés industriels et reste un enjeu majeur. De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude approfondie de ce domaine en considérant l'organisation des systèmes, la matière et l'énergie, les comportements collectifs et leurs propriétés émergentes inhérentes, etc. Parmi les approches de modélisation/simulation utilisées, la modélisation & simulation basées agent (Agent Based Modeling and Simulation (ABMS)) propose un ensemble d'outils théoriques et pratiques pour décomposer le système global en des sous-systèmes qui le constituent. L'impact attendu de cette démarche est dit phénomène d'émergence où le comportement du système aussi complexe soit-il émerge des comportements locaux des différentes entités en interaction qui le composent. Il est à noter, cependant, que comme toute démarche de modélisation ; il y'a lieu de considérer les outils 'pour modéliser le système' de ceux 'qui modélisent' le phénomène lui-même. Dans le cadre de l'ABMS, une idée générale est de considérer que 'tout est agent' à contrario de l'approche prônant l'hybridation d'outils de conception et de modélisation. Dans l'industrie moderne, des technologies de pointe sont utilisées pour développer des procédés industriels. La grande majorité de ces systèmes peuvent être considérés comme 'compliqués' ou 'complexes' dans le sens où ils sont composés d'un grand nombre d'éléments en interaction. A notre connaissance, les frontières entre ces deux notions sont assez floues et dépendent en grande partie des évolutions des outils et avancées technologiques. En effet, on peut donner une image naïve de ce phénomène à travers des idées, somme toutes, assez simplistes ; le système d'exploitation

### Chapitre 3 : La simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Windows 95 comporte 15 million de lignes de code et était ; à l'époque, qualifié de complexe en requérant une configuration matérielle qui semble de nos jours dérisoire (420 Mo de RAM).

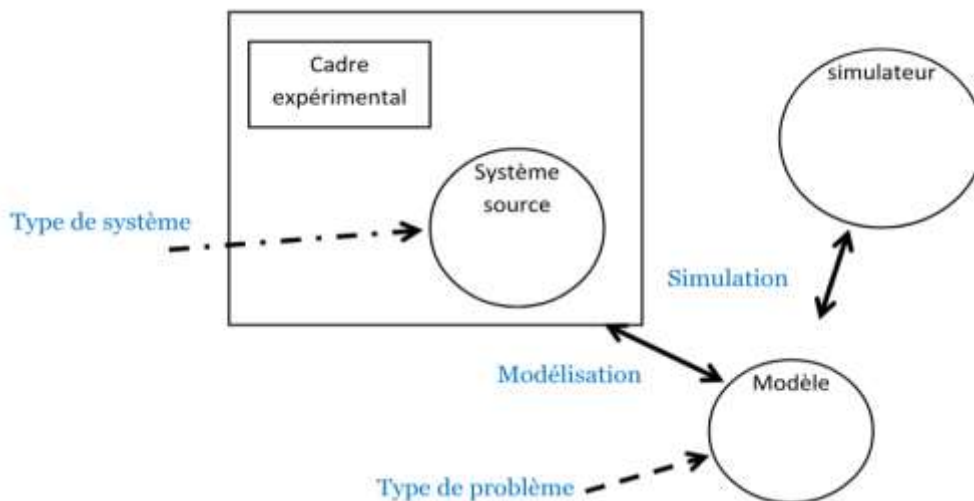
L'objet du travail présenté ici porte sur une étude concernant les principaux outils et plateformes dédiés à modélisation et la simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil puis à la proposition d'un ensemble d'idées pour une approche basée SMA en vue de la conception d'un simulateur dans ce domaine. Notre équipe a mené divers projets similaires en utilisant différentes approches (DEVS, MAS, etc.) dans le cadre de la conception/réalisation de simulateurs industriels, spécialement pour les complexes pétrochimiques. L'utilisation d'outils informatiques de modélisation offre l'avantage de construire un modèle informatique très fidèle au système considéré ou à un ensemble de ses parties, puis de juger du comportement du modèle obtenu en fonction des jeux de données fournis en entrée. Cela permet de manipuler, d'observer et d'améliorer la compréhension de son comportement et permet d'éviter de nombreuses erreurs possibles concernant ses évolutions futures. L'arrêt de certains grands systèmes dits critiques peut entraîner des dommages matériels et financiers. Pour ces systèmes, l'utilisation de modèles les représentant est d'une aide substantielle. En effet, au lieu d'arrêter le fonctionnement de tout ou partie d'une usine, il suffit de considérer les modèles qui les représentent. C'est le cas, par exemple, des chaudières industrielles. L'arrêt de tels équipements peut causer des dommages financiers à l'usine et leur redémarrage peut prendre beaucoup de temps créant, ainsi, beaucoup de retard dans les systèmes de production.

La modélisation des systèmes a fait l'objet de nombreuses études et recherches compte tenu de son impact important sur les phénomènes mis en œuvre. Certains auteurs considèrent la modélisation comme un ensemble de métaphores et d'analogies permettant de mieux appréhender tout phénomène. Par exemple, on définit la simulation informatique comme suit : « La simulation informatique est la discipline de conception d'un modèle d'un système physique réel ou théorique, l'exécution du modèle sur un ordinateur numérique et l'analyse de la sortie d'exécution ».

### 2.3. Le processus de Modélisation/Simulation

Trois phases fondamentales s'envisagent dans ce cadre : La création du modèle, l'exécution du modèle obtenu et les résultats obtenus (figure 3.1). Le processus de simulation peut se détailler selon les critères suivants :

- 1) Le système source abstrait ou réel d'intérêt.
- 2) Les conditions d'expérimentation du système.
- 3) La spécification du système qui définit le modèle : un programme informatique, un ensemble de règles mathématiques, d'équations ou d'autres contraintes pour la génération du comportement du système.
- 4) Le système de calcul dit simulateur qui est un système capable d'exécuter le modèle obtenu pour générer son comportement.
- 5) La relation de modélisation, qui traite de la relation entre un modèle, un système et un cadre expérimental. Il définit la validité du modèle, sa capacité à capturer fidèlement le comportement du système dans la mesure exigée par l'objectif de l'étude de simulation.
- 6) La relation de simulation, qui définit la relation entre un simulateur et un modèle. Il s'agit de la capacité du simulateur à simuler correctement le modèle, à générer fidèlement la trajectoire de sortie du modèle compte tenu de son état initial et de sa trajectoire d'entrée.



**Figure 3.1:** Cadre conceptuel pour la modélisation/simulation

### Chapitre 3 : La simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

De ces définitions, on peut déduire que le modèle d'expérimentation est ce que l'on appelle sa simulation. Pratiquement, une simulation est la phase d'exécution du modèle. A partir d'un ensemble de données pertinentes en entrée du modèle, cette phase consiste à faire évoluer le modèle et à observer et analyser les résultats obtenus. Dans certains cas, la simulation de systèmes complexes peut prendre des heures voire des jours et consomme beaucoup de temps CPU. C'est pourquoi les développeurs ont recours à des méthodes de réduction de la complexité. Parmi ces méthodes, on peut citer la décomposition du phénomène en plusieurs entités de moindre complexité ou l'utilisation de CPU rapides et parallèles.

La recherche d'une plus grande fidélité, de précision et d'adaptation nécessite que les outils informatiques de modélisation et de simulation soient choisis avec le plus grand soin. Leur utilisation dans le domaine de la modélisation et de la simulation est très répandue assurant d'excellentes qualités dont l'amélioration est continue avec des coûts très raisonnables.

Plusieurs approches, méthodes et outils de modélisation ont été et continuent à être utilisés dans la littérature. Les réseaux de Petri (RdP ou Petri Nets : PN) comptent parmi les outils les plus efficaces et les plus largement utilisés. Ces réseaux, malgré leur simplicité, permettent de représenter la dynamique des systèmes. Plusieurs variantes et extensions de ces réseaux ont été développées telles que les réseaux de Petri colorés (Colored PN (CPN)) et les réseaux de Pétri temporisés (Timed PN). Malgré leurs soixante-deux ans d'existence (PN a été introduit par Adam Petri en 1962 dans sa thèse de doctorat), ils continuent à être pertinents aujourd'hui.

Les diagrammes d'états UML (Unified Modeling Language) sont d'autres outils semi-formels puissants capables de représenter le comportement et les interactions entre les acteurs d'un système. De plus UML est normalisé par l'OMG (Object Management Group). Les systèmes multi-agents (MAS) sont d'autres outils de modélisation utilisés, qui offrent l'avantage d'une décomposition fine d'un système complexe réel en un ensemble de ses composants. Le comportement du système global émerge de celui des comportements de ses composants. La notion d'agent désigne une entité dont le fonctionnement est autonome et qui est capable de réaliser un ensemble de tâches. Ces systèmes sont de plus en plus utilisés dans les systèmes informatiques en raison de leur force d'expression, leur souplesse, leur simplicité, leur efficacité,

et leur possibilité d'extension. De plus, la description donnée par un SMA peut être plus facilement comprise par un observateur humain et s'adapte complètement au système représenté.

Dans ce travail, nous avons adopté une méthode descendante pour la conception de simulateurs industriels et utilisé une approche de modélisation et de simulation à base d'agents (ABMS) pour les avantages susmentionnés. L'ensemble du système est décomposé en sous-systèmes pertinents. Un agent réactif représente chacun d'eux. La communication entre les agents est assurée par le passage de messages. Pour concevoir le modèle du simulateur, nous avons opté pour le modèle organisationnel AALAADIN. Nous avons utilisé la plateforme multi-agents MADKIT (Multi Agent Development KIT) pour la mise en œuvre du modèle obtenu. AALAADIN et MADKIT ont été développés au Laboratoire d'informatique, de robotique, de mécanique et de micro-électronique (LIRMM) de Montpellier par l'équipe du professeur J. Ferber.

#### **2.4. Outils pour la simulation**

Il est évident qu'avant d'implémenter ou de déployer un nouveau protocole pour les réseaux de capteurs sans fil, il est nécessaire d'évaluer et de tester les algorithmes proposés. La simulation informatique offre un moyen simple, adéquat, rapide, flexible, adaptable, robuste et relativement peu coûteux pour l'évaluation de tels protocoles.

De nos jours, il existe de nombreux simulateurs de réseaux de capteurs sans fil. Ces simulateurs présentent plusieurs caractéristiques concernant leurs exigences particulières, leur conception et les outils proposés. Les critères pour les simulateurs des réseaux de capteurs sans fil incluent, entre autres caractéristiques, la modélisation de la consommation d'énergie et l'évolutivité.

Ces dernières années, nous avons assisté à une large gamme d'outils et de plates-formes dédiées à la simulation de réseaux filaires et sans fil. Le développeur peut choisir des outils particuliers en fonction de son application. La disponibilité de l'outil en question, l'expérience du développeur et sa capacité à manier ces outils sont des éléments clés pour mener à bien et réussir une bonne activité de simulation.

De plus, certaines plateformes sont en open source et d'autres commerciales. A titre d'exemple, nous présentons dans ce qui suit quelques plateformes dédiées à la simulation de réseaux de communications. Au choix de sélection des utilisateurs, plusieurs articles de recherche ont

proposé des critères comparatifs pour évaluer les simulateurs de réseaux. On trouvera dans la suite de ce chapitre plusieurs études comparatives pour ce genre de simulateurs.

Un logiciel Open Source (FOSS : Free Open Source Software) est un logiciel à licence libre dans le sens où un utilisateur peut librement accéder au code source de ce logiciel, en effectuer des modifications, l'utiliser gratuitement et le distribuer. Un tel logiciel peut être utilisé dans des applications diverses. Il existe plusieurs simulateurs de réseau qui sont Open Source, parmi ces logiciels on distingue : NS2, NS3, OMNET++, JSIM, ... Quelques détails de simulateurs assez utilisés sont mentionnés ci-dessous :

### **1) Le Simulateur NS2 (Network Simulator 2) :**

Ce simulateur compte parmi les outils qui ont été les plus utilisés. C'est un simulateur à événements discrets qui peut prendre en charge la simulation de TCP, les protocoles de multidiffusion et le routage sur des réseaux sans fil et câblés. NS2 a été développé en 1995 sous Virtual Inter Network Test-bed (VINT) avec l'effort conjoint de l'Institut des sciences de l'information de l'Université de Californie du Sud, de l'Université de Californie à Berkeley, du Centre de recherche Xerox Palo Alto et du Lawrence Berkeley National Laboratory. La Defense Advanced Research Projects Agency et la National Science Foundation sont les principaux sponsors de NS2. Les différents modules de simulation de réseau sans fil mobile, c'est-à-dire les modèles de propagation radio, le protocole IEEE 802.11 MAC, les protocoles de routage ad hoc (c'est-à-dire AODV, DSR), l'IP mobile et les modèles de mobilité sont fournis par Monarch Project. NS2 est encore étendu par SensorSim pour prendre en charge la simulation pour les réseaux de capteurs.

#### **➤ Caractéristiques principales :**

- NS2 peut être utilisé pour la simulation parallèle et distribuée (PDNS) en présentant de bons résultats (assez proches de la réalité) pour la conception de simulation.
- NS2 est disponible gratuitement et possède une grande bibliothèque de modèles. Son code source peut être facilement modifié par les chercheurs.

Limites :

- L'évolutivité de NS2 est très faible en termes d'utilisation de la mémoire et de temps de simulation dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN), les réseaux peer to peer et les réseaux où des centaines de nœuds sont utilisés.
- L'énergie consommée par le matériel, les logiciels et les composants des nœuds WSN ne peut pas être facilement mesurée.

## **2) Le simulateur NS3 (Network simulator 3) :**

Le simulateur NS-3 est également un simulateur de réseau à événements discrets lancé en 2006 à des fins de recherche et d'enseignement. Il s'agit d'un logiciel gratuit sous licence GNU GPLv2.

Les principales caractéristiques de NS3 par rapport à NS2 sont les suivantes :

- Noyau modulaire et documenté.
  - Programmes C++ avec script Python
  - Plus proche des systèmes réels
  - Intégration logicielle
  - Système d'attributs
  - Modèles mis à jour
- **Caractéristiques principales :**
- Il présente de bonnes caractéristiques d'évolutivité ; car il est intégré aux caractéristiques architecturales et porte le code de GTNetS.
  - Il est également capable d'effectuer des simulations de réseau à grande échelle de manière efficace.
  - Il fonctionne bien en termes d'utilisation de la mémoire.
  - Cela résout le problème de la crédibilité.
- **Limites :**
- NS3 dispose de moins de modèles de simulation que NS2 et il est moins utilisé que ce dernier.
  - De plus, il n'a pas les capacités telles que l'utilisation de l'adressage IP, la conception et l'alignement avec les protocoles Internet, la gestion de plusieurs interfaces, les détails sur les modèles 802.11, etc.
  - NS3 intègre le banc d'essai et la virtualisation

### **3) OMNET++ (banc d'essai de réseau modulaire objectif en C++)**

OMNET++ est un simulateur de réseau à événements discrets à usage général, extensible, modulaire, basé sur des composants et à architecture ouverte. Il est autorisé sous sa propre licence publique académique uniquement dans des contextes non commerciaux. Il est le plus couramment utilisé pour la simulation de réseaux informatiques, la mise en file d'attente de simulations de réseaux, etc. Une simulation OMNET ++ contient autant de modules simples qui forment le comportement atomique d'un modèle. Il fonctionne sur Linux, d'autres systèmes de type UNIX et sur Windows (XP, Win2K) et MAC-OS.

#### **➤ Caractéristiques principales :**

- C'est un simulateur très bien structuré et il ne se limite pas aux simulations de protocole réseau comme NS2.
- L'une des principales caractéristiques réside dans le fait que les modules de OMNET ++ peuvent être réutilisables et qu'ils peuvent être combinés de plusieurs façons.
- Il est basé sur le langage C++ pour modéliser les réseaux de communication et autres systèmes distribués.
- Il prend en charge certains protocoles MAC et certains protocoles localisés dans les réseaux de capteurs sans fil.

#### **➤ Limites :**

- Certains scénarios et simulations ne peuvent pas être implémentés et exécutés dans ces simulateurs car certaines fonctionnalités ne sont pas présentes.
- Des protocoles limités sont disponibles.

### **4) JSIM (Java Simulator)**

JSIM comme son nom l'indique, c'est un système de simulation basé sur Java qui est utilisé pour l'analyse et la construction de modèles numériques quantitatifs par rapport

aux données de référence des expériences. Il est disponible gratuitement avec le code source. Fondamentalement, JSIM fournit un environnement de développement d'applications avec une architecture basée sur des composants. JSIM a été développé par une équipe du DRCL (Distributed Real-time Computing Laboratory) qui a été parrainé par le DARPA's Information Technology Office, l'Air Force Office of Scientific Research's Multidisciplinary University Research, la National Science Foundation (NSF), l'Ohio State University et l'Université de l'Illinois à Urbana Champaign.

➤ **Caractéristiques principales :**

- Il montre une bonne évolutivité par rapport aux autres simulateurs.
- Il fournit une plate-forme indépendante, réutilisable et extensible.
- Des protocoles et des composants de réseaux câblés et sans fil peuvent y être implémentés.

➤ **Limites :**

- Plus compliqué à utiliser que NS2.
- Moins efficace et une surcharge se produit dans les modèles de communication en raison de l'utilisation du langage Java.

**5) OPNET (Outils d'ingénierie de réseau optimisés)**

OPNET est un simulateur de réseaux à événements discrets écrit en C++ et proposé en 1986 par le MIT. Il s'agit d'un logiciel de simulation disponible dans le commerce bien établi et principalement utilisé. Cependant, il peut être utilisé gratuitement par les chercheurs dans les universités et les programmes éducatifs. Il prend également en charge divers matériels réseau tels que les antennes et les émetteurs-récepteurs. La caractéristique la plus importante d'OPNET est sa capacité à surveiller et à exécuter divers scénarios simultanément. Il permet aux utilisateurs, à l'aide d'une interface graphique, de développer des modèles et des graphiques. OPNET Modeler fournit diverses fonctionnalités telles que la conception, l'étude de protocoles, de réseaux,

d'appareils et d'applications. Ce modélisateur fonctionne sur les systèmes Windows et Linux.

➤ **Caractéristiques principales :**

- Les paramètres des modèles peuvent être modifiés.
- Fournit un riche ensemble de modules pour chaque pile de protocoles comme IEEE802.11, IEEE 802.15.4 et divers protocoles de routage, à savoir AODV et DSR.

➤ **Limites :**

- Le problème d'évolutivité qui est dû à la conception orientée objet.
- Le nombre de protocoles disponibles est restreint.

## 6) QUALNET

Le simulateur QUALNET est un simulateur de réseau ad hoc commercial qui a été développé par Scalable Network Technologies et qui est basé sur le protocole GloMoSim. Qualnet fournit un environnement à l'utilisateur pour concevoir de nouveaux modèles de protocole, améliorer les protocoles nouveaux ou existants, concevoir des réseaux câblés et sans fil à l'aide de modèles existants et analyser leurs performances. Le code source présent dans le modèle aide les développeurs à créer de nouvelles fonctions ainsi qu'à modifier celles existantes. Les principales caractéristiques de Qualnet sont la vitesse, l'évolutivité, l'extensibilité, etc. Il est écrit en Parsec (basé sur C) car il est construit sur GloMoSim.

➤ **Caractéristiques principales :**

- Facile à utiliser et à apprendre.
- Facile à stimuler un réseau large et hétérogène.

➤ **Limites :**

### Chapitre 3 : La simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

- Les codes conviviaux sont limités en raison de la disponibilité de nombreuses fonctions intégrées.

<b>Simulateur</b>	<b>Language</b>	<b>Type</b>
Ns-2	C++, TCL	Open Source
OPNET	C	Commercial
OMNeT++	C / C++ and Java	Open Source
QualNet	C/C++	Commercial
NetSim	C / C++ and Java	Commercial
Ns-3	C/C++	Open Source
J-Sim	Java	Open Source
NetLogo	Java,TCL	Open Source
Castalia	C/C++	Open Source
CupCarbon	Java	Open Source
SensorSim	C/C++	Open Source

**Tableau 3.1 :** Quelques simulateurs des RCsF

De plus, la plupart des langages de programmation proposent des extensions et des frameworks pour la simulation de systèmes. Parmi ces environnements de programmation, MATLAB (MATLAB signifie Matrix Laboratory) est un langage commercial de programmation et de simulation numérique développé par Mathworks. Ce langage possède des fonctionnalités puissantes et variées qui sont continuellement améliorées. L'environnement MATLAB/SIMULINK fournit plusieurs outils avancés pour divers domaines de simulation ainsi que des interfaces graphiques très développées. Plusieurs scénarios de simulation, notamment dans le cas des RCsF, ont été implémentés à l'aide de MATLAB / SIMULINK.

### 3. Les paramètres de simulation

Il existe des caractéristiques spécifiques et d'autres plus générales à prendre en compte lors de la simulation de protocoles WSN. Parmi les facteurs les plus utilisés, on retrouve les suivants :

- 1) **La taille du réseau** : Il s'agit de la zone couverte par le WSN.
- 2) **Le nombre de nœuds du réseau** : Dans le cadre de simulation dynamique ce nombre peut évoluer durant la simulation.
- 3) **L'énergie initiale** : Désigne la quantité d'énergie initiale du WSN. En général, il s'agit de l'énergie totale du réseau. Dans ce cas, il est judicieux de penser que l'énergie initiale d'un nœud est le résultat de la division de cette énergie initiale par le nombre de nœuds (cas théorique).
- 4) **La durée de la simulation** : désigne le temps imparti à la simulation du réseau. Ce temps peut être réajusté en fonction de l'évolution de la simulation.
- 5) **La latence** : la latence est le temps nécessaire pour qu'un paquet soit transmis du nœud source vers la station de base.
- 6) **La latence moyenne est la somme des latences** de tous les paquets divisés par le nombre total de paquets reçus.
- 7) **Le taux de réussite** : qui représente le rapport entre le nombre de paquets reçus par la station de base et le nombre total de paquets envoyés par tous les nœuds du réseau.
- 8) **L'énergie moyenne consommée par rapport au nombre de nœuds dans le réseau** : l'objectif principal du protocole de routage est de minimiser la consommation d'énergie du nœud, car elle affecte directement la durée de vie du réseau.

C'est pourquoi il peut être pratique de comparer un protocole spécifique avec d'autres protocoles en termes d'énergie moyenne consommée par tous les nœuds du réseau.

- 9) **La durée de vie du réseau** : la durée de vie du réseau peut être définie de trois manières :
- 10) **FND (First Node Died)** : est aussi appelé période de stabilité, c'est l'intervalle de temps entre le début de la simulation et la mort du premier nœud.
- 11) **HND (Half Node Died)** : c'est le temps entre le début de la simulation et le moment de la mort des demi-nœuds.

**Chapitre 3 : La simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil**

- 12) LND (Last Node Died) :** c'est le temps entre le début de la simulation et l'heure de mort du dernier nœud.
- 13) Le nombre de nœuds vivants par tour :** qui mesure le nombre de nœuds vivants à chaque tour.
- 14) L'énergie consommée :** mesure l'énergie consommée par les nœuds à travers la simulation. L'objectif principal des protocoles de routage est généralement focalisée autour du problème de la gestion énergétique qui est le problème clé dans la vie du réseau.
- 15) La sécurité :** La sécurité est un aspect important dans les RCsF. Les données peuvent être facilement interceptées et peuvent être modifiées ou déviées de leur destination initiale.

Afin de réaliser des comparaisons efficaces entre un protocole donné et d'autres protocoles existants, le simulateur doit disposer de données pré-enregistrées concernant autant de protocoles existants que possible. Cette base de données doit être évolutive.

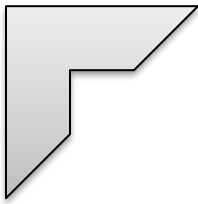
<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Network size	100 sensors
Topology configuration mode	Randomized
Number of trigger nodes	05 trigger nodes
Network size	100 m x 100 m
Sensor node transmission range node	30 meters
Initial node energy	2 Joules
Radio Transmission power (Watt)	0.028 watts
Radio Reception power (Watt)	0.036 watts
MAC sub-layer	MAC IEEE 802.11
Packet size	25 Bytes

Minimum Energy	0.001 joule
Maximum duration of the simulation	3600 seconds

**Tableau 3.2 :** Exemples de paramètres de simulation

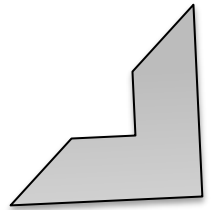
## **4. Conclusion**

Les réseaux de capteurs sans fil constituent une technologie émergente très prometteuse, extrêmement utile et largement utilisée. Les données obtenues sont acheminées depuis les nœuds capteurs vers les utilisateurs finaux distants à l'aide de protocoles de routage. Par conséquent, l'efficacité de ces dernières doit être testée en permanence. Les outils de simulation offrent des moyens d'analyse, d'évaluation et de comparaison des protocoles.



## *Chapitre 4 :*

# *Simulation du protocole LEACH*



## 1. Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à la mise en œuvre d'une application permettant la simulation d'un protocole de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Comme, nous l'avons indiqué au chapitre 3, plusieurs simulateurs permettent d'avoir des résultats efficaces pour ce genre de simulation. Cependant, le fonctionnement de ces simulateurs est transparent à l'utilisateur qui dispose d'interfaces lui permettant de définir ses paramètres pour avoir les résultats de la simulation. Nous définissons, dans ce qui suit les étapes essentielles d'un simulateur écrit en MATLAB en l'appliquant pour simuler le protocole hiérarchique LEACH.

## 2. Simulation des Protocoles de Routage dans les Réseaux de Capteurs sans Fil avec MATLAB

MATLAB est un environnement de calcul numérique et un langage de programmation performant pour le développement d'algorithmes, l'analyse de données et la simulation de systèmes. Il est particulièrement utile pour la simulation des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) grâce à ses outils de visualisation et ses bibliothèques mathématiques avancées.

### 2.1. Étapes de la Simulation avec MATLAB

Les principales étapes de la simulation peuvent se résumer selon le plan suivant :

1. **Définition de la Topologie du Réseau** : Cette première étape consiste à définir la disposition spatiale des capteurs et des stations de base et de déterminer les paramètres de simulation. Il s'agit, ensuite de coder les script MATLAB pour créer une topologie de réseau de capteurs.
2. **Modélisation de la Communication sans Fil** : Il s'agit de modéliser la propagation des signaux sans fil. Cette étape est cruciale pour une simulation réaliste. Il s'agit d'utiliser un modèle de propagation basé sur la distance et l'énergie dépensée.

L'un des modèles d'énergie utilisé est le suivant est celui défini par (Heinzenman et al., 2002). La quantité d'énergie dissipée par l'émetteur pour transmettre de  $k$  bits de données est calculée selon les équations (4.1) et (4.2) :

$$E_{tx}(k, d) = \begin{cases} E_{elec} * k + E_{fs} * k * d^2 & \text{si } d < d_0 \\ E_{elec} * k + E_{amp} * k * d^4 & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{amp}}} \quad (4.2)$$

Où  $E_{tx}(k, d)$  est l'énergie dissipée par l'émetteur,  $E_{amp}$  est l'amplificateur de puissance,  $E_{elec}$  est l'énergie des appareils électroniques,  $d$  est la distance de transmission,  $E_{fs}$  est l'énergie d'amplification dans l'espace libre,  $d_0$  est la distance seuil qui dépend de l'environnement et  $k$  représente le nombre de bits transmis.

L'équation (4.3) donne l'énergie dissipée par le récepteur pour  $k$  bits de données :

$$E_{rx} = kE_{elec} \quad (4.3)$$

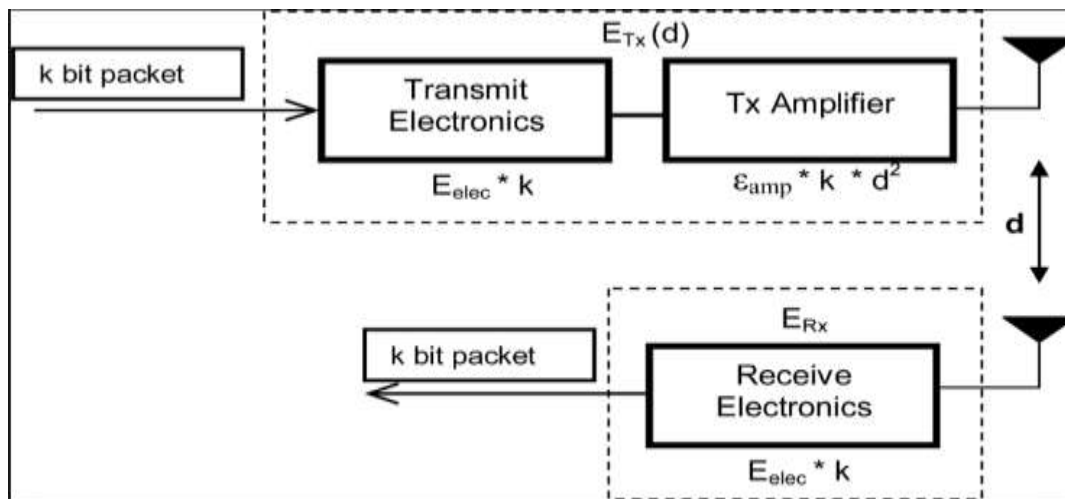


Figure 4.1 : Modèle d'énergie (adapté de Heinzelman et al., 2002).

3. **Implémentation du Protocole de Routage :** Il s'agit, ici, d'implémenter le protocole de routage selon son algorithme. En général, le routage est basé sur la distance minimale à la station de base.

4. **Simulation et analyse des résultats** : Enfin, il s'agit à ce niveau d'exécuter la simulation pour collecter des données sur les performances du protocole, telles que la consommation d'énergie et la latence.

### 3. Interfaces de l'application

Notre application est un outil de simulation pour les réseaux de capteurs sans fil, utilisant le protocole LEACH. Elle permet de configurer et de visualiser un réseau de capteurs sans fil dans une zone définie par des dimensions maximales (X Max et Y Max) et de spécifier divers paramètres tels que le nombre de nœuds, l'énergie initiale de chaque nœud ( $E_0$ ), le nombre de cycles de simulation ( $k$ ), et la probabilité de sélection d'un chef de cluster ( $p$ ). Les coordonnées du récepteur (SinkX et SinkY) peuvent également être définies. Une fois les paramètres configurés, la simulation peut être lancée pour observer la distribution des nœuds et le comportement du réseau. L'application génère des résultats détaillés sur le nombre de nœuds actifs par tour, le nombre de transmissions, l'énergie consommée et l'énergie moyenne restante.

Nous décrivons, dans ce qui suit, quelques interfaces de notre application.

#### 3.1. Interface graphique de déploiement des nœuds du réseau

Cette interface permet de saisir la topologie du réseau.

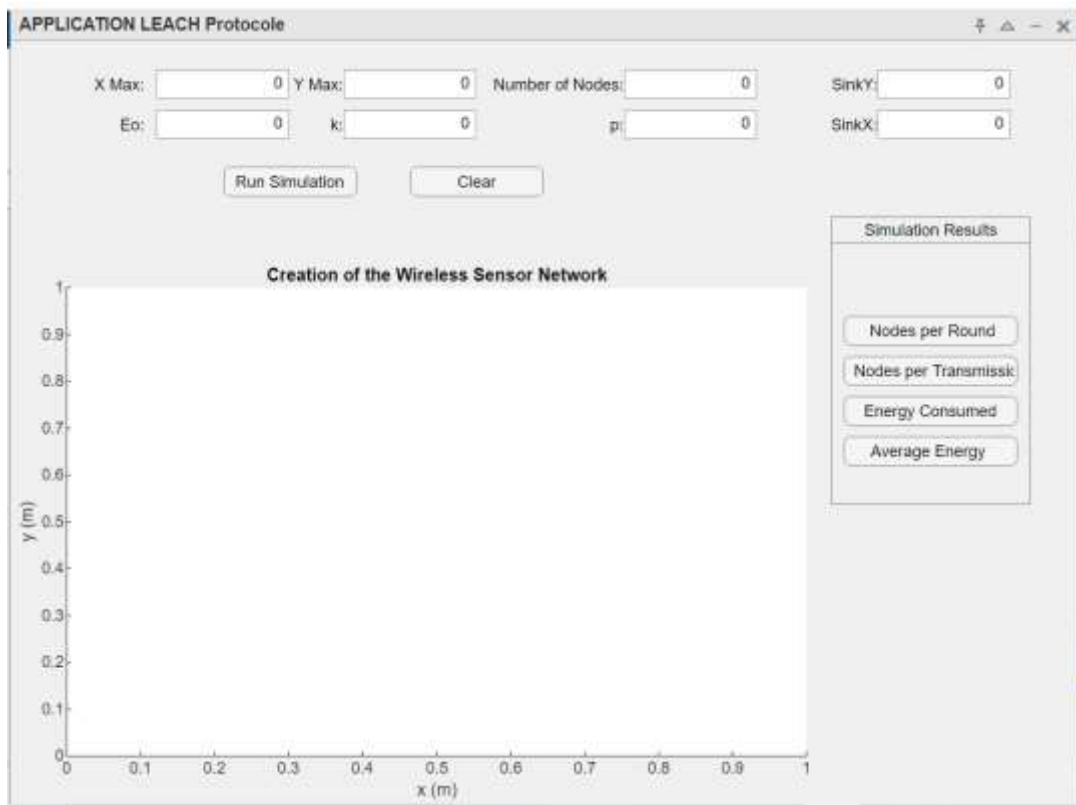


Figure 4.2: Interface de l'application.

### 3.2. Exemple de déploiement

➤ Paramètres de la simulation

Pour la simulation nous avons utilisé les paramètres et les valeurs portés sur ce tableau :

Paramètres	Valeurs
Network size	100 sensors
Network size	200m x 200m
Coordinates of the Sink	SinkX100 /sinkY50
suggested percentage of cluster head	P= 0.05
Initial node energy	2 Joules

Size of data package	4000 bits
Data Aggregation Energy	$5 \cdot 10^{-9}$ Joules/bit
Transmit Amplifier Types	$100 \cdot 10^{-12}$ joules/bit/m <sup>2</sup>
$E_{Tx}$ (L'énergie de transmission)	$50 \cdot 10^{-9}$ joules/bit
$E_{Rx}$ (L'énergie de réception)	$50 \cdot 10^{-9}$ joules/bit

Tableau 4.1: Paramètres de simulation.

### ➤ Résultats de la simulation

L'interface inclut un graphique central qui montre la répartition des nœuds dans la zone de simulation, avec chaque point bleu représentant un nœud de capteur et l'étoile rouge représentant la station de base ou (sink) qui collecte les données des nœuds de capteurs.

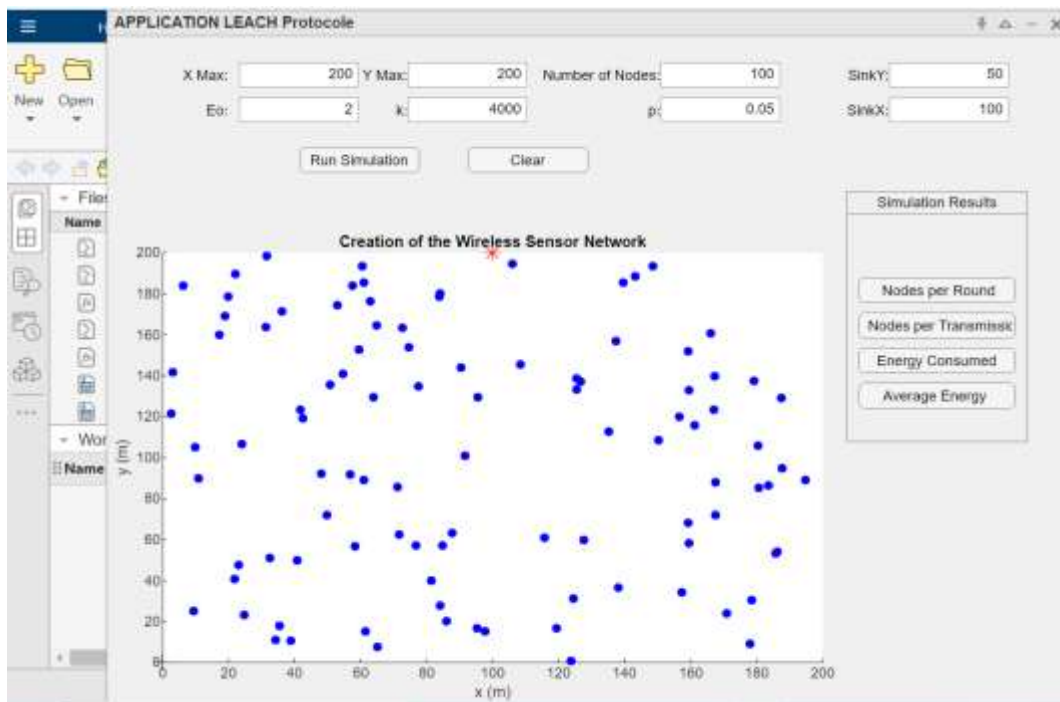
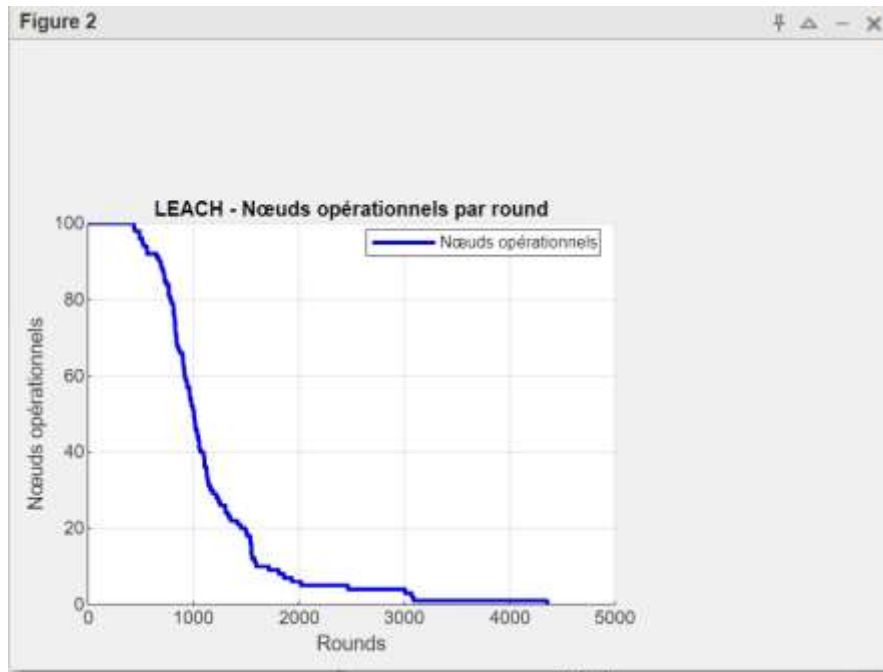


Figure 4.3: Création du réseau de capteur sans fil.

### 3.3 Les Courbes

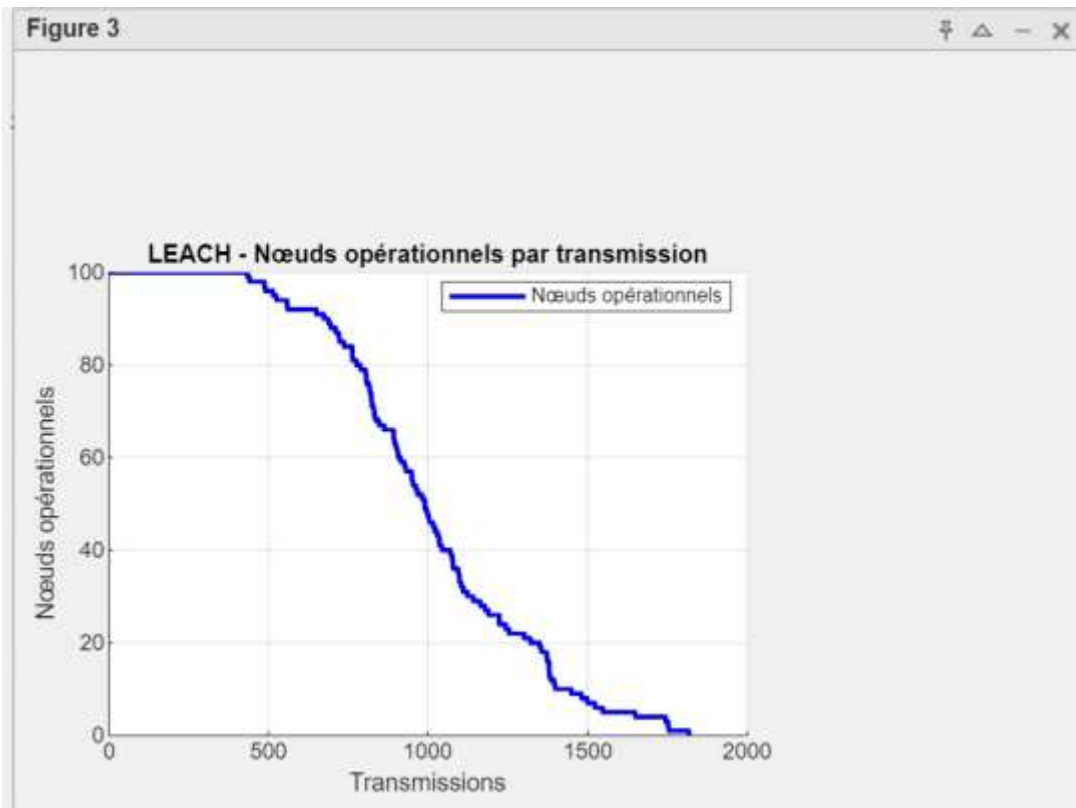
- Nœuds opérationnels par round :



**Figure 4.4 :** Nœuds opérationnels par round.

La figure 4.4 montre le graphique de l'évolution des nœuds opérationnels dans un réseau de capteurs utilisant le protocole LEACH au fil des rounds. Initialement, tous les nœuds sont actifs, mais une forte décroissance se produit dans les premiers 1000 rounds, indiquant une consommation rapide d'énergie. La décroissance devient plus lente entre 1000 et 2000 rounds, puis se stabilise avant de continuer à diminuer progressivement, avec presque aucun nœud opérationnel après 3000 rounds. Cette courbe donne un aperçu précieux de la performance du protocole LEACH en termes de gestion de l'énergie et de durée de vie des nœuds dans un réseau de capteurs sans fil.

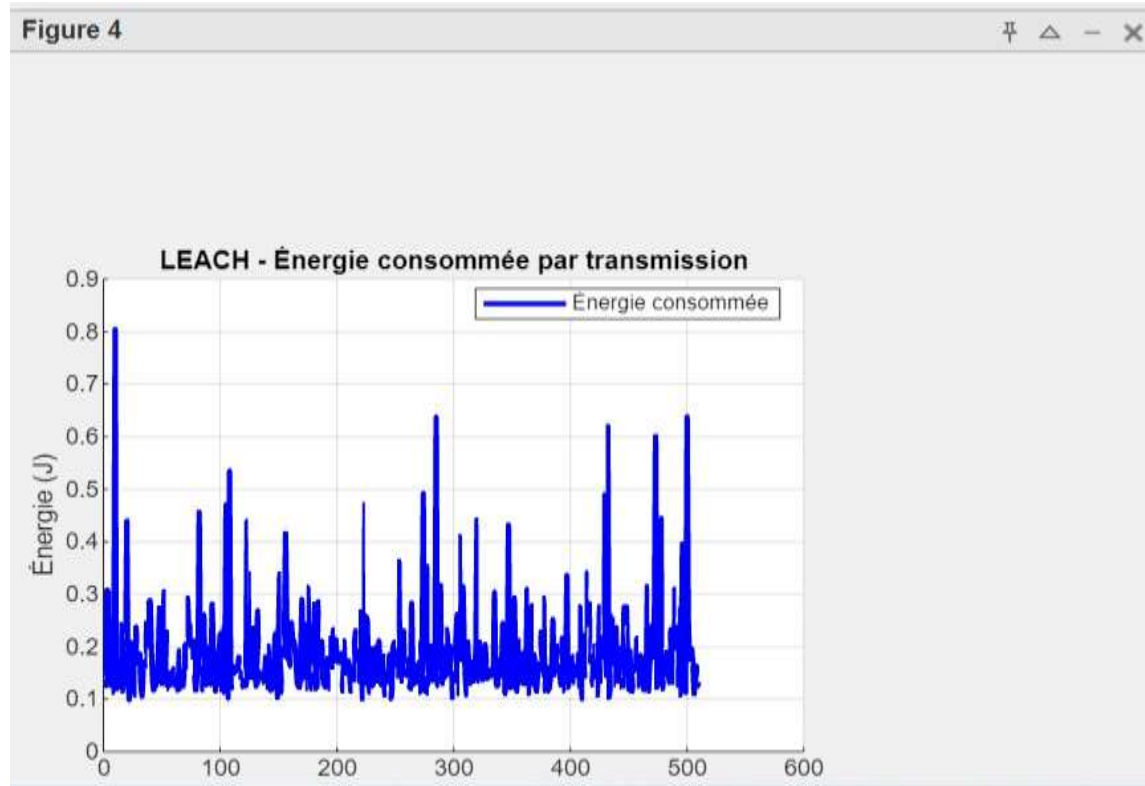
- **Nœuds opérationnels par transmission :**



**Figure 4.5 :** Nœuds opérationnels par transmission.

La figure 4.5, affiche le graphique de la diminution du nombre de nœuds opérationnels dans un réseau de capteurs sans fil utilisant le protocole LEACH au fil des transmissions. Initialement, tous les nœuds sont actifs, mais une chute rapide se produit dans les premiers 500 transmissions, indiquant une consommation d'énergie élevée. La décroissance devient ensuite plus progressive jusqu'à 1000 transmissions, puis se stabilise avant de diminuer lentement, avec très peu de nœuds actifs après 1500 transmissions. Cette courbe illustre la performance énergétique du protocole LEACH et la manière dont il prolonge la durée de vie du réseau malgré l'épuisement progressif des nœuds.

- **Énergie consommée par transmission :**



**Figure 4.6 :** énergie consommée par transmission.

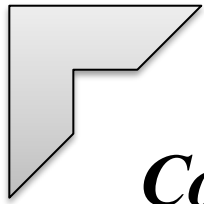
La courbe présentée dans la figure 4.6 illustre la consommation d'énergie en joules lors de transmissions dans un réseau de capteurs sans fil utilisant le protocole LEACH. On observe des fluctuations significatives de la consommation d'énergie, avec des pics atteignant jusqu'à 0,8 J, notamment autour des transmissions 50, 200, 300, 450, et 500, suggérant des périodes de forte activité ou des transmissions nécessitant plus de ressources. Entre ces pics, la consommation oscille souvent autour de 0,1 à 0,4J, indiquant des périodes de moindre consommation énergétique.

## 4. Conclusion

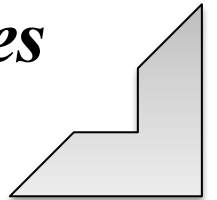
La simulation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil avec MATLAB permet de modéliser, visualiser et analyser les performances des protocoles dans divers scénarios. En ajustant les paramètres de simulation et en expérimentant avec différents

protocoles, les chercheurs peuvent optimiser les performances des RCSF pour des applications spécifiques.

Ce chapitre a présenté l'essentiel de l'application relative à l'implémentation d'un simulateur MATLAB pour LEACH. Un tel outil est essentiel pour la mise au point et l'expérimentation d'un protocole de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Cet outil est conçu de façon modulaire et pour passer d'un protocole de routage à un autre, il faut modifier l'étape 3 relative à l'algorithme du protocole.



## *Conclusion générale et perspectives*



## **Conclusion Générale et Perspectives**

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent une innovation technologique essentielle avec un vaste potentiel d'applications dans des domaines variés tels que la surveillance environnementale, l'agriculture intelligente, la santé, et la gestion des infrastructures. Ces réseaux permettent de collecter et de transmettre des données cruciales de manière autonome et efficace, améliorant ainsi notre capacité à surveiller et à gérer diverses conditions et systèmes.

Cependant, la conception et la mise en œuvre des RCSF présentent plusieurs défis, notamment en termes de gestion de l'énergie, de fiabilité des communications, de sécurité des données, et de robustesse face aux conditions environnementales. Les protocoles de routage optimisés et les technologies avancées de communication sont essentiels pour surmonter ces obstacles et maximiser les performances des réseaux.

Ce mémoire a dressé une étude du domaine des réseaux de capteurs sans fil et des principaux simulateurs avec la réalisation d'un mini-simulateur basé sur MATLAB.

Plusieurs perspectives à ce travail peuvent être envisagées telles que la généralisation de ce simulateur afin qu'il englobe beaucoup plus de fonctionnalité et son adaptation à une gamme plus large de protocoles.

En conclusion, les réseaux de capteurs sans fil sont une technologie prometteuse qui continuera d'évoluer et de s'améliorer grâce à l'innovation continue et à la recherche. Les simulateurs joueront un rôle central dans cette évolution, permettant aux chercheurs et aux ingénieurs de tester et d'optimiser les solutions avant leur déploiement, assurant ainsi des applications fiables et efficaces dans le monde réel.

## Bibliographie

- [1]. Ouad Imane, D. J. I. E. D., & Ibtihal, H. A. L. I. M. I. Evaluation des Performances des Différents Protocoles de Routage des Réseaux AD HOC pour les Réseaux Multi-UAV (FANET) Etude Comparative des Protocoles DSDV et AODV (Doctoral dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA).
- [2]. SAAD, M. G. Ordonnancement dans un réseau mobile ad hoc.
- [3]. Lamine, M. M. (2008). Securite dans les Reseaux de Capteurs Sans-Fil. Memoire de Magistere en Informatique Ecole Doctorale d'Informatique de bejaia.
- [4]. Altronics. (s. d.). Capteurs de mesure. Altronics. Récupéré le 15 février 2024, à partir de <https://altronics.fr/fr/guide/capteurs-de-mesure/>
- [5]. SEHLI, A., ELBAR, A., & KADDI, M. (2023). Transmission de données sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [6]. Bouallegue, M. (2016). Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université du Maine).
- [7]. CHEKHAR, C., & KADDI, M. (2022). Une nouvelle approche pour la minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université Ahmed DRAIA-Adrar).
- [8]. TAIBI, D., & AMMAR, A. (2023). Étude comparative de deux types de protocoles de couverture dans les réseaux de capteur sans fil (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun).

- [9]. Kacimi, R. (2009). Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation).
- [10]. FDOUL, A., DJERIFILI, S., & KADDI, K. (2022). Amélioration de l'efficacité énergétique pour les RCSF via une méthode métaheuristique (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [11]. BENZOUADA, B., KADDI, M., & OMARI, M. (2023). Contributions à l'optimisation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [12]. Tossa, F. (2022). Optimisation de la couverture d'une zone plane sous la contrainte de connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté ; Université d'Abomey-Calavi (Bénin)).
- [13]. GUERFI, I., & HATTAB, M. Etude comparative entre les deux protocoles de routage CTP et LEACH dans les réseaux WSNs (Doctoral dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA).
- [14]. Ngom, D. (2016). Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse ; Université Cheikh Anta Diop (Dakar)).
- [15]. HASNAOUI, I. (2022). La maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil à base de Fuzzy CMeans (Doctoral dissertation, Université Larbi Tébessi-Tébessa).
- [16]. Smaili, A., Khidaoui, M. T., & KADDI, M. (2022). Amélioration de l'efficacité énergétique de RCSF à l'aide d'une approche multi-couche (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).

- [17]. Athmani, S. (2010). Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [18]. Ziani, Y. (2013). Étude comparative de méthodes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil pour le domaine résidentiel (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [19]. Yaichi, S., & Baassi, A. (2020). Une nouvelle approche pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteur sans fil.
- [20]. REBAH, H. R., & RAHMANI, N. (2023). Méthode de détection d'anomalies dans les réseaux de capteurs sans fil basée sur les séries temporelles (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun).
- [21]. Obi, E. (2023). Protocoles de routage basés sur l'apprentissage par renforcement pour l'optimisation de la durée de vie et de l'énergie des réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- [22]. Ameer, K. H. E. M. A. N. E. (2020). Amélioration des performances d'un Protocole de Routage pour Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (Doctoral dissertation, Université laarbi tebessi tebessa).
- [23]. Dihia, B., & Lydia, F. (2016). Proposition d'un protocole de routage hiérarchique Sécurisé pour les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [24]. Ahmed, M. M., & Mohamed, M. H. Les performances des protocoles de routage visant la Qos dans les réseaux de capteurs sans fil.
- [25]. Rachida, A. (2011). Sécurisation du protocole de routage direct diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

- [26]. Ngom, D. (2016). Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse ; Université Cheikh Anta Diop (Dakar)).
- [27]. Guemmadi, S. (2020). Adaptation de clustering phase de protocole de routage «LEACH» pour les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université laarbi tebessi tebessa).
- [28]. FELLAH, K. S., & BEHIIH, M. (2021). Analyse les performances d'un routage aléatoire sur les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret)
- [29]. Bosco, T. J. (2011). Proposition d'un nouveau protocole de routage avec agrégation des données pour contrôler la congestion dans un réseau de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [30]. DLIM, R., TOUATI, M., & Demri, M. (2017). Une approche bio-inspiré basé pour la conception d'un protocole de routage à base de clustering dans les RCFs (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar).
- [31]. Yousef, Y. (2010). Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Mulhouse).
- [32]. Dihia, B., & Lydia, F. (2016). Proposition d'un protocole de routage hiérarchique Sécurisé pour les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [33]. Souad Imane, D. J. I. E. D., & Ibtihal, H. A. L. I. M. I. Evaluation des Performances des Différents Protocoles de Routage des Réseaux AD HOC pour les Réseaux Multi-UAV (FANET) Etude Comparative des Protocoles DSDV et AODV (Doctoral dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA).

- [34]. ABDELLAOUI, M. (2023). Protocole de Routage ad-hoc: Etude et simulation (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun).
- [35]. Boubiche, D. E. (2008). Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des sciences de l'ingénieur).
- [36]. Sofiane, A. D. O. U. A. N. E. (2021). Conception d'un protocole de routage hiérarchique efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil.
- [37]. Grover, J., & Sharma, M. (2014, October). Optimized GAF in wireless sensor network. In Proceedings of 3rd International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (pp. 1-6). IEEE.
- [38]. Aissani, M. (2011). Optimisation du routage dans les réseaux de capteurs pour les applications temps-réel (Doctoral dissertation, Alger).
- [39]. Récupérer le 9 mars 2024, à partir de [https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module\\_RCSF\\_49.html](https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_49.html)