REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes Des Télécommunications

Recherche du modèle de déplacement optimal d'un collecteur de données dans un réseau de capteur sans fil WSN

Présentés par :

Miloudi Maria

Kaci Redouane

Proposés et Dirigés par :

Mr. Guedmani Mohamed

Promotion 2022-2023

Dédicaces

Avant tout, à moi-même,

Pour ma détermination, ma persévérance et ma volonté de repousser mes limites. Ce mémoire est le fruit de mon travail acharné et de ma passion pour ce domaine, et il témoigne de ma croissance personnelle et intellectuelle.

À ma famille aimante et dévouée,
Papa, maman, abir, abdou, nesrine et elhachemi. Qui sont toujours été ma source d'inspiration et de soutien inconditionnel tout au long de ce parcours académique.

À mes amis précieux,
Spécialement Nour elhouda. À ratiba, imane, yakout, soumia, faiza et imona Pour leurs sourires réconfortants, leurs encouragements incessants et leur présence constante.

Que cette dédicace témoigne de ma gratitude profonde envers tous ceux qui ont contribué à mon parcours universitaire et qui ont rendu cette réalisation possible. Je vous en suis éternellement reconnaissant.
Bien cordialement,

Maria Miloudi

Dédicaces

J e dédier ce mémoire

À ma chère mère, qui a toujours été présente pour moi, qui m'a soutenu et encouragé à chaque étape de ma vie, et dont ses douaas et l'amour ont été une source de force inépuisable.

À mon cher père, pour son soutien inconditionnel, ses conseils avisés et son exemple inspirant qui m'ont aidé à grandir et à devenir la personne que je suis aujourd'hui.

À ma sœur et mon frère pour leurs encouragements.

À Mon chère neveu Rayene

Que Dieu nous garde toujours ensemble et aimants.

A tous mes amis

A tous ceux qui me sont chers.

Redouane Kaci

Remercîments

tenons en premier lieu à remercier ALLAH de nous avoir donné la chance d'y exister, le courage et la patience pour réaliser ce projet.

Nous remercions nos chers parents pour leur grand soutien.

Nous remercions notre promoteur Monsieur Guedmani Mohamed *pour nous avoir encadré et donné la chance d'acquérir des connaissances dans le domaine des Réseaux de Capteurs Sans Fil, pour sa présence, sa motivation et son sens d'organisation.*

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Nos remerciements à ceux et celles qui de loin ou de près ont contribué à la réalisation de ce travail.

ملخص

في هذه المذكرة، أجرينا دراسة مقارنة حول سلوك شبكة استشعار لاسلكية مع محطة أساسية ثابتة ومتنقلة، باستخدام ثلاث بروتوكولات توجيه (LEACH homogène ، LEACH hétérogène وSEP) تهدف دراستنا إلى تقييم ثلاثة معايير: الاستقرار، استهلاك الطاقة وحياة الشبكة .

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد نمط حركة المحطة الأساسية الأمثل لتحسين تشغيل شبكة الاستشعار اللاسلكية. لتسهيل تحقيق مشاريع ملموسة.

كلمات مفتاحية: شبكات المستشعرات اللاسلكية، بروتوكول التوجيه، استهلاك الطاقة، الاستقرار وحركة المحطة الأساسية.

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude comparative sur le comportement d'un réseau de capteurs sans fil avec une station de base fixe et mobile, en utilisant trois protocoles de routage (LEACH homogène, LEACH hétérogène et SEP). Notre étude vise à évaluer trois critères : la stabilité, la consommation d'énergie et la durée de vie du réseau.

L'objectif de cette étude est de déterminer le modèle optimal de mouvement de la station de base pour optimiser le fonctionnement du réseau de capteurs sans fil; afin de faciliter la réalisation des projets concrets.

Mots-clés : Réseaux de capteurs sans fil, protocole de routage, consommation d'énergie, stabilité et mouvement de la station de base.

Abstract

In this thesis, we conducted a comparative study on the behavior of a wireless sensor network with a fixed and mobile base station, using three routing protocols (homogeneous LEACH, heterogeneous LEACH and SEP). Our study aimed to evaluate three criteria: stability, energy consumption and lifetime of the network.

The objective of this study is to determine the optimal base station movement model to optimize the operation of the wireless sensor network; in order to facilitate the realization of concrete projects.

Keywords: Wireless sensor networks, routing protocol, energy consumption, stability, base station movement.

Sommaire

Liste des figures I

Liste des tableaux III

Liste des abréviations IV

Introduction générale 2

Chapitre I : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil 4

I.1. Introduction 5

I.2. Définitions de réseau de capteurs sans fil 5

I.3. Architecture d'un RCSF 5

I.3.1. Principaux composants de RCSF 6

I.3.1.1. Nœuds de capteurs (sensor) 6

I.3.1.2. Les passerelles (Gateway) 7

I.3.1.3. La Station de base (base station) 7

I.4. Les catégories de RCSF 9

1.4.1. RCSF homogène et hétérogène : 9

1.4.2. RCSF à un et à plusieurs sauts : 9

1.4.3. RCSF statique et mobile : 9

1.4.4. Station de base statique et mobile RCSF : 9

1.4.5. Station de base unique et multiple RCSF : 9

1.4.6. RCSF déterministe et non déterministe : 10

1.4.7. RCSF auto-reconfigurable et non-auto-configurable : 10

I.5. Caractéristiques de RCSF 10

I.6. Domaines d'application de RCSF 11

I.7. Les avantages et les contraintes de RCSF 14
I.7.2. Les contraintes de RCSF 14
I.8. La consommation d'énergie..... 15
I.9. Conclusion……16
Chapitre II : Les protocoles de routages dans les WSN 18
II.1. Introduction..... 19
II.2. Le routage dans les RCSF 19
II.2.1. Le mode de fonctionnement du protocole : 19
II.3. Caractéristiques de topologie hiérarchique..... 22
II.3.1. La typologie des clusters générés 22
II.4. Le protocole LEACH..... 24
II.4.1. Définition 24
II.4.2. Architecture de LEACH..... 24
II.4.3. Principe de fonctionnement de LEACH 24
II.5. Avantages et inconvénients du protocole LEACH 27
II.6. SEP (Stable Election Protocol) : 27
Chapitre III : Impacte de déplacement de la station de base dans un WSN..... 30
III.1. Introduction 31
III.2. La simulation dans les réseaux de capteurs sans fil..... 31
III.2.1. Besoin de simulation..... 31
III.2.2. Le programme MATLAB 32
III.2.3. Les Scénarios de la simulation..... 32
III.2.4. La modélisation du réseau : 33
III.2.5. Critères d'évaluation 34
III.2.6. Les Paramètres de simulation 34
III.2.7. Equations de simulation de déplacement de la station de base..... 35

III.3. Résultats de simulation 37
III.3.1. Résultats de simulation pour le premier scenario 38
III.3.2. Résultats de simulation pour le deuxième scenario 40
III.3.3 Résultats de simulation pour le troisième scenario 42
III.3.4 Résultats de simulation pour le quatrième scenario 44
III.4. Analyse et interprétation des résultats 46
III.4.1. La stabilité 46
III.4.2. L'énergie consommée pendant la stabilité 48
III.4.3. Durée de vie 50
III.5. Conclusion 52
Conclusion générale 53
Perspectives 54
Références bibliographiques 55

Liste des figures

Figure I.1 *: Capteurs sans fils (sensor) …… 6*
Figure I.2: *Architecture d'un nœud de capteurs sans fil……..7*
Figure I.3 *: Architecture d'un RCSF……...7*
Figure I.4 : *la topologie plate d'un RCSF……8*
Figure I.5 : *la topologie hiérarchique d'un RCSF…….. 8*
Figure I.6 : *RCSF à un et à plusieurs sauts respectivement ……..…9*
Figure I.7 *: domaine militaire de RCSF ……11*
Figure I.8 : *Domaine environnemental de RCSF……11*
Figure I.9 : *Domaine agriculturale de RCSF ……12*
Figure I.10 : *Domaine de la santé de RCSF……12*
Figure I.11 : *domaine de maintenance de RCSF……13*
Figure I.12*: domaine sécuritaire de RCSF……13*
Figure I.13 *: Modèle de consommation d'énergie……16*
Figure II.1 *: Classification des protocoles de routage pour les RCSF.……21*
Figure II.2 : *La phase de configuration de LEACH ……25*
Figure II.3 : *canal TDMA (Time Division Multiple Access)……26*
Figure. III.1 : *une SB fixé au centre dans un WSN homogène……38*
Figure. III.2 : *une SB fixé au centre dans un WSN hétérogène……38*
Figure. III.3: *la stabilité dans un WSN (homogène et hétérogène) avec une SB fixée au centre……39*
Figure. III.4: *l'énergie consommée pendant la stabilité par une SB fixée au centre avec les trois protocoles ……39*
Figure. III.5 : *SB avec une trajectoire aléatoire dans un WSN homogène……40*
Figure. III.6 : *SB avec une trajectoire aléatoire dans un WSN hétérogène……40*
Figure. III.7:*stabilité dans WSN (homogène et hétérogène) avec une SB aléatoire dans Le champ……41*
Figure. III.8: *énergie consommée pendant la stabilité par une SB aléatoire dans le champ avec les trois protocoles……41*
Figure. III.9 : *SB avec une trajectoire sur tout le périmètre d'un WSN homogène……42*
Figure. III.10 : *SB avec une trajectoire sur tout le périmètre d'un WSN hétérogène……42*

Figure. III.11: *stabilité dans WSN (homogène et hétérogène) avec une SB sur tout le périmètre de champ……43*
Figure. III.12: *énergie consommée pendant la stabilité par une SB sur tout le périmètre de champ avec les trois protocoles……43*
Figure. III.13 : *SB avec une trajectoire en diagonal d'un WSN homogène……44*
Figure. III.14 : *SB avec une trajectoire en diagonal d'un WSN hétérogène……44*
Figure. III.15: *stabilité dans WSN (homogène et hétérogène) avec une SB en diagonal de champ……45*
Figure. III.16: *énergie consommée pendant la stabilité par une SB en diagonal de champ avec les trois protocoles……45*
Figure. III.17: *histogramme de la stabilité des différents emplacements de la SB avec les trois protocoles……46*
Figure. III.18: *énergie consommée pendant la stabilité dans différents emplacements de la SB par les trois protocoles……48*
Figure. III.19 : *histogramme de la durée de vie des nœuds capteur dans WSN des différents emplacements de la SB avec les trois protocoles……50*

Liste des tableaux

Tableau III.1 : *les paramètres de simulation……..……35*

Tableau III.2 : *les algorithmes de simulation……..37*

Tableau III.3 : *la stabilité du réseau avec différents emplacements de la SB par les trois protocoles……46*

Tableau III.4 : l'énergie *consommée pendant la stabilité des différents emplacements de la SB avec les trois protocoles……..……48*

Tableau III.5 : *la durée de vie des nœuds capteur dans WSN des différents emplacements de la SB avec les trois protocoles……50*

Liste des abréviations

CAN : *convertisseur analogique / numérique*

CH: *Cluster Head*

FND: *First Node Dead*

HND: *Half Node Dead*

IA: *Intelligence Artificielle*

IP: *Internet Protocol*

LEACH : *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*

LND: *Last Node Dead*

QOS: *quality of service*

RCSF *: réseau capteur sans fil*

RF : *radio fréquence*

SB: *station de base*

SEP : *Stable Election Protocol*

TDMA: *Time Division Multiple Access*

WSN *: Wireless sensor network*

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, les réseaux de capteurs sans fil ont connu un développement spectaculaire, transformant la capacité à collecter et à transmettre des données dans divers environnements. L'historique du développement du problème d'énergie dans les WSN remonte à leurs premières utilisations dans plusieurs domaines. Les recherches initiales ont porté sur la miniaturisation des capteurs, l'amélioration de leurs capacités de communication et la prolongation de leur durée de vie grâce à une gestion efficace de l'énergie.

La miniaturisation des capteurs a été rendue possible grâce aux avancées dans les domaines de la microélectronique et des systèmes embarqués. Les capteurs sont devenus de plus en plus petits, permettant leur intégration dans des nœuds compacts et peu coûteux. Cette évolution a permis le déploiement de réseaux de capteurs à grande échelle, couvrant des zones géographiques étendues et fournissant une surveillance en temps réel.

Cependant, la petite taille des nœuds capteurs a également entraîné des contraintes énergétiques considérables. Les capteurs fonctionnent généralement sur des batteries limitées, ce qui nécessite une gestion efficace de l'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau. La question de l'énergie est donc devenue un défi majeur dans les WSN, car les nœuds capteurs doivent accomplir leurs tâches tout en conservant suffisamment d'énergie pour le fonctionnement à long terme.

Dans ce contexte, notre mémoire se concentre sur l'étude approfondie des WSN, en mettant l'accent sur les défis liés à la gestion de l'énergie. Nous explorons les différentes techniques et approches pour optimiser l'utilisation de l'énergie dans les WSN, en examinant les protocoles de communication économes en énergie, les stratégies de routage efficaces, les méthodes de contrôle de la consommation d'énergie et les techniques de récupération d'énergie.

Le premier chapitre explore les généralités sur les WSN, en mettant l'accent sur leurs caractéristiques, leur architecture et leurs applications. Nous analysons également les principales contraintes énergétiques auxquelles les WSN sont confrontés, notamment la consommation d'énergie des capteurs.

Le deuxième chapitre se concentre sur les protocoles de routage utilisés dans les WSN pour optimiser la consommation d'énergie. Nous examinons en détail deux protocoles spécifiques, à savoir LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) et SEP (Stable Election Protocol). Ces protocoles sont largement étudiés et ont prouvé leur efficacité pour prolonger la durée de vie

du réseau en distribuant intelligemment les tâches de communication et en formant des clusters de nœuds capteurs.

Dans le troisième chapitre, nous comparons les performances des protocoles LEACH homogène et hétérogène, ainsi que le protocole SEP, dans des scénarios de déplacement de la station de base le long de différents trajets. Nous examinons comment ces protocoles se comportent dans des environnements dynamiques et comment ils gèrent la répartition de la charge de communication entre les nœuds. Nous analysons également l'impact de la mobilité de la station de base sur la durée de vie de la batterie des nœuds.

Notre objectif est d'analyser les avancées actuelles dans le domaine des WSN et de proposer de nouvelles perspectives pour une utilisation plus efficace de l'énergie, ce qui permettrait d'améliorer la durée de vie des réseaux et d'optimiser les performances des applications qui en dépendent. À travers ce mémoire, nous cherchons à contribuer à l'avancement de cette technologie prometteuse et à ouvrir la voie vers de nouvelles possibilités d'application des WSN.

Chapitre I : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

I.1. Introduction

Grâce aux récentes avancées en matière de technologies sans fil et électroniques, des capteurs minuscules et peu énergivores peuvent maintenant être développés à faible coût. Cette évolution a considérablement contribué à l'avancement des réseaux de capteurs sans fil, qui offrent un champ d'application très vaste et varié dans des domaines tels que la science, la logistique, la défense et la santé. Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des cents nouvelles technologies qui bouleverseront le monde en révolutionnant notre mode de vie, notre travail et notre interaction avec l'environnement physique.

Dans ce chapitre, nous allons définir les concepts de réseau de capteurs et de nœud capteur, présenter leur architecture, leurs caractéristiques, leur fonctionnement et les domaines d'application associés.

I.2. Définitions de réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil (WSN : Wireless Sensor Networks) est un réseau de dispositifs de capteurs distribués, autonomes et autoorganisés, interconnectés sans fil pour surveiller l'environnement physique. Les nœuds de capteurs collectent et transmettent des données sur des paramètres tels que la température, la pression, l'humidité, la luminosité, les vibrations, le son et les images. Ces réseaux sont utilisés dans divers domaines tels que la surveillance environnementale, la sécurité, la santé et la surveillance industrielle. [1]

I.3. Architecture d'un RCSF

L'architecture d'un réseau de capteurs sans fil (WSN) se compose généralement de trois éléments clés : les nœuds de capteurs, les passerelles, et le centre de contrôle. Dans cette architecture, les nœuds de capteurs collectent des données sur l'environnement et les transmettent à la passerelle, qui est responsable de la transmission des données au centre de contrôle.

I.3.1. Principaux composants de RCSF

I.3.1.1. Nœuds de capteurs (sensor)

- **Définition :** Les nœuds de capteurs sont des dispositifs qui combinent des capteurs et des circuits de communication sans fil pour collecter et transmettre des données à d'autres nœuds de capteurs ou à un système central. Ils peuvent être alimentés par batterie ou par énergie solaire.

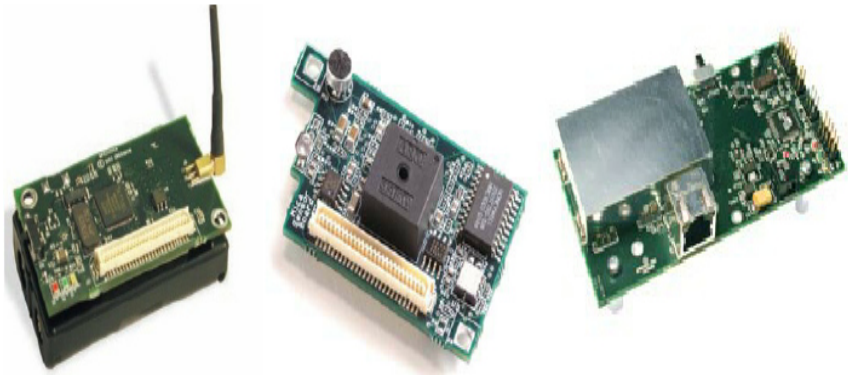


Figure I.1 *: Capteurs sans fils (sensor)* [1]

- **Les composants de capteur**

Les composants de capteur peuvent varier en fonction du contexte de l'application. Les principaux composants d'un nœud de capteur sont : processeur, capteur, mémoire, alimentation. [2]

- **Les unités de base**

Les unités de base sont présentes dans chaque nœud de capteur d'un réseau de capteurs sans fil (WSN) pour leur permettre de fonctionner de manière autonome et efficace :

- L'unité de captage : est chargée de convertir les signaux analogiques des capteurs en signaux numériques compréhensibles pour l'unité de traitement.
- L'unité de traitement : gère les procédures de communication avec le reste du réseau et peut également analyser les données captées.
- L'unité de transmission : assure l'émission et la réception des données sur un médium sans fil, soit par radiofréquence (RF), soit par optique.
- L'unité de contrôle : d'énergie est responsable de la gestion de l'énergie disponible et de la réduction des dépenses. [3]

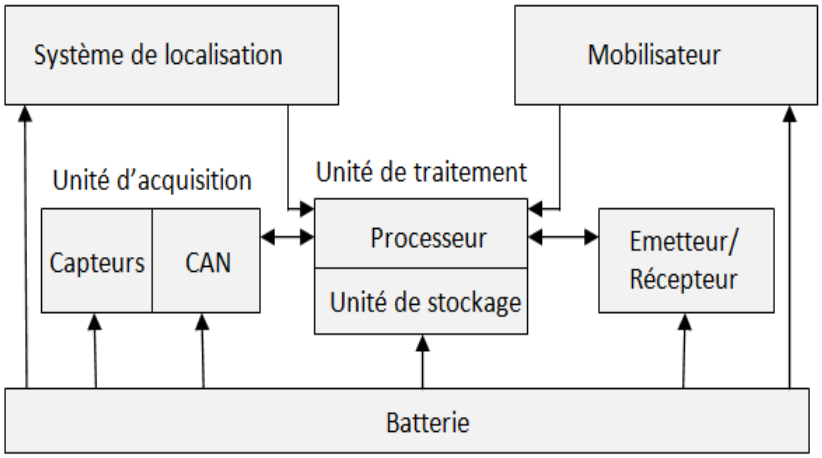


Figure I.2: *Architecture d'un nœud de capteurs sans fil* [2]

I.3.1.2. Les passerelles (Gateway)

Les passerelles sont des dispositifs qui assurent la communication entre les nœuds de capteurs et la station de base. Elles peuvent être équipées d'une antenne pour permettre la transmission des données sur une plus grande distance et à une plus grande vitesse que les nœuds de capteurs. Les passerelles peuvent également effectuer un certain traitement des données avant de les transmettre au centre de contrôle. [4]

I.3.1.3. La Station de base (base station)

La Station de base (SB) est l'élément central du réseau de capteurs sans fil, où les données collectées par les nœuds de capteurs sont stockées, analysées et traitées. Il peut être composé d'un ordinateur central, d'une base de données, de logiciels d'analyse de données et d'interfaces utilisateur pour la visualisation et la gestion des données. [4]

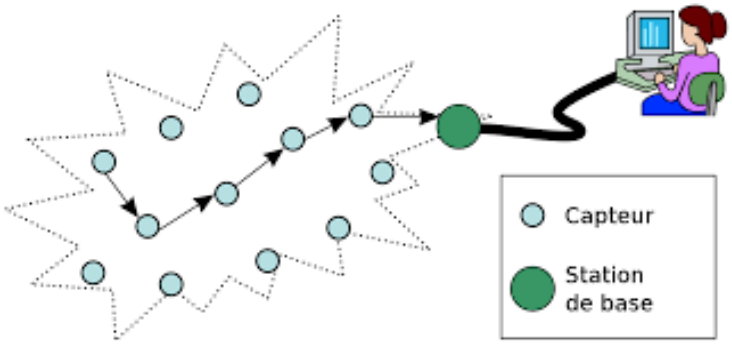


Figure I.3 *: Architecture d'un RCSF* [4]

I.3.2. La topologie du RCSF

La topologie est l'organisation des capteurs dans un réseau [5] :

- **Structure plate :** tous les nœuds capteurs dans un RCSF ont un rôle équivalent et travaillent en collaboration pour assurer les opérations de routage. Les réseaux plats se distinguent par leur simplicité et leur capacité à tolérer les pannes. Cependant, à mesure que le nombre de nœuds augmente, les performances de ces réseaux commencent à se dégrader



Figure I.4 : *la topologie plate d'un RCSF* [5]

- **Structure hiérarchique :** cette topologie organise les nœuds capteurs en groupes appelés clusters. Chaque cluster est dirigé par un chef de cluster qui coordonne les activités des nœuds capteurs. Les données collectées par les nœuds capteurs sont agrégées au niveau des chefs de cluster, puis transmises vers une SB pour l'analyse et la prise de décision.

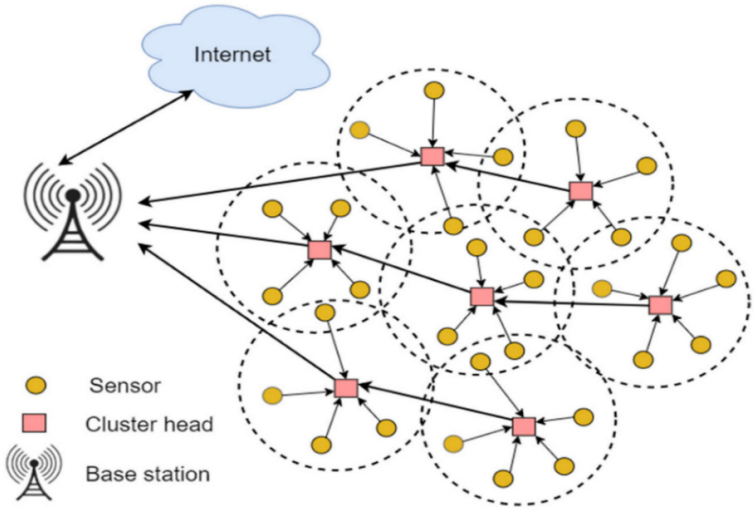


Figure I.5 : *la topologie hiérarchique d'un RCSF* [6]

I.4. Les catégories de RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leurs caractéristiques et de leurs applications. Voici les principales classifications :

1.4.1. RCSF homogène et hétérogène : Les réseaux homogènes ont des nœuds de capteurs avec des capacités de stockage, de puissance de calcul et de consommation d'énergie similaires, tandis que les réseaux hétérogènes ont des nœuds de capteurs avec des besoins en puissance de calcul et en énergie différents et les tâches de traitement et de communication sont divisées en conséquence.

1.4.2. RCSF à un et à plusieurs sauts : Dans les réseaux à un seul saut, les nœuds de capteurs communiquent directement avec la station de base, tandis que dans les réseaux à plusieurs sauts, les données sont transmises par des nœuds relais intermédiaires pour économiser de l'énergie.

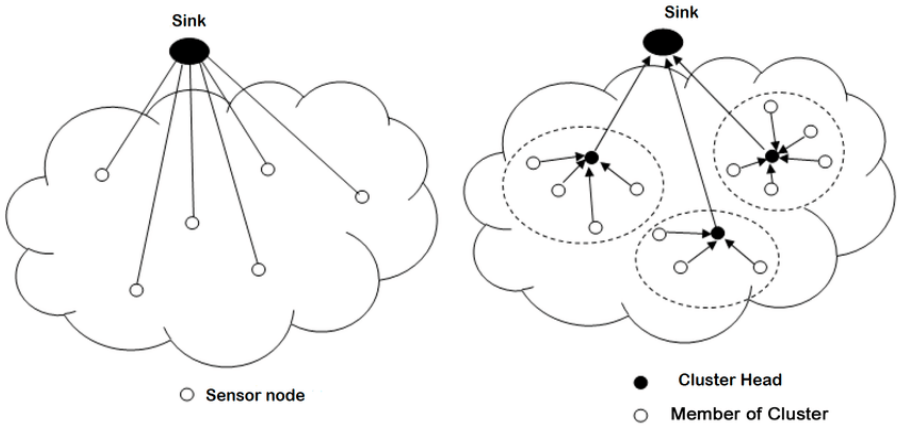


Figure I.6 : *RCSF à un et à plusieurs sauts respectivement*

1.4.3. RCSF statique et mobile : Les réseaux statiques sont composés de nœuds de capteurs fixes, tandis que les réseaux mobiles sont constitués de nœuds de capteurs qui se déplacent, par exemple, pour surveiller des animaux.

1.4.4. Station de base statique et mobile RCSF : Les SB peuvent être statiques, c'est-à-dire avec une position fixe, ou mobiles, ce qui permet de répartir la charge des nœuds de capteurs.

1.4.5. Station de base unique et multiple RCSF : Dans les réseaux à SB unique, tous les nœuds de capteurs communiquent avec une seule SB située à proximité, tandis que dans les réseaux à SB multiple, plusieurs stations de base sont utilisées et un nœud de capteur peut transférer des données vers la SB la plus proche.

1.4.6. RCSF déterministe et non déterministe : Les réseaux déterministes ont des nœuds de capteurs dont la position est fixe et prédéterminée, tandis que les réseaux non déterministes ont des nœuds de capteurs dont la position peut varier en fonction de facteurs tels que l'environnement et les conditions de fonctionnement.

1.4.7. RCSF auto-reconfigurable et non-auto-configurable : Les réseaux auto-reconfigurables sont capables de s'organiser en réseau et de travailler en collaboration avec d'autres nœuds de capteurs pour accomplir la tâche, tandis que les réseaux non auto-configurables dépendent d'une unité de contrôle pour collecter des informations.

I.5. Caractéristiques de RCSF

Voici quelques-unes des caractéristiques clés des RCSF :

- **Capteurs distribués** : Les nœuds de capteurs sont répartis dans une zone spécifique, généralement dans un environnement où il est difficile ou impossible pour les humains d'accéder. Cette caractéristique permet une surveillance ou une collecte de données de manière efficace dans des zones où il serait difficile ou dangereux pour les humains d'aller. [6]
- **Faible consommation d'énergie** : Les capteurs sont généralement alimentés par des batteries et ont des capacités limitées en termes de mémoire, de capacité de calcul et de transmission. Ils sont donc conçus pour avoir une faible consommation d'énergie afin d'optimiser leur durée de vie. [7]
- **Communication sans fil :** Les nœuds de capteurs communiquent entre eux en utilisant des protocoles de communication sans fil tels que ZigBee. Cette caractéristique permet une communication efficace entre les nœuds de capteurs, sans avoir besoin de câblage. [8]
- **Auto-organisation :** Les RCSF sont conçus pour être auto-organisés, c'est-à-dire que les nœuds de capteurs sont capables de s'organiser automatiquement en réseau sans intervention humaine. Cela permet aux RCSF de s'adapter rapidement aux changements d'environnement. [1]
- **Agrégation des données :** Les données collectées par les nœuds de capteurs sont agrégées et traitées par des nœuds de traitement pour réduire la quantité de données à transmettre et économiser de l'énergie. Cette caractéristique permet une utilisation efficace de la bande passante limitée des réseaux sans fil. [9]

I.6. Domaines d'application de RCSF

Les RCSF sont utilisés dans plusieurs domaines d'application, notamment :

✓ **Applications militaires** : Les RCSF sont largement utilisés dans les applications militaires pour la surveillance, la détection et la localisation d'objets. Ils peuvent être déployés pour la surveillance de zones frontalières, la collecte d'informations sur les mouvements de troupes ennemies, et la surveillance de zones sensibles. Les données collectées peuvent être utilisées pour prendre des décisions opérationnelles importantes. [10]

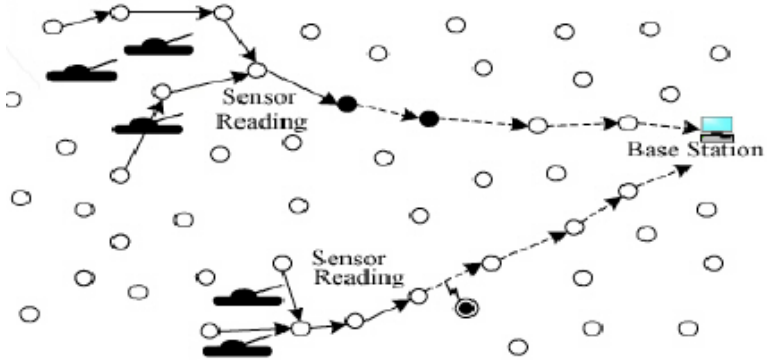


Figure I.7 *: domaine militaire de RCSF* [10]

✓ **Surveillance de l'environnement :** Les RCSF sont utilisés pour la surveillance de l'environnement, y compris la surveillance de la qualité de l'air, la surveillance de la pollution de l'eau, la surveillance de la qualité du sol et la surveillance de la faune. Les capteurs peuvent être déployés dans des zones isolées pour collecter des données environnementales en temps réel, qui peuvent être utilisées pour des études scientifiques ou pour des décisions de gestion environnementale. [10]

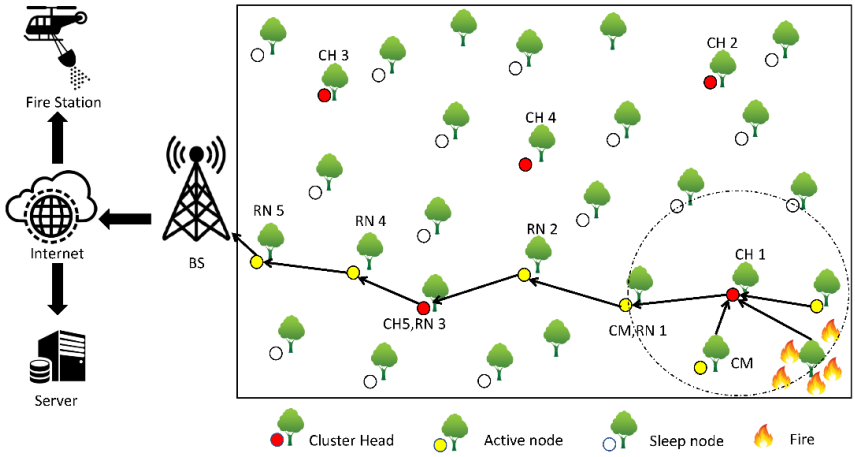


Figure I.8 : *Domaine environnemental de RCSF* [10]

✓ **Agriculture de précision** : Les RCSF sont utilisés dans l'agriculture pour le but d'optimiser la production agricole. Les données collectées peuvent être utilisées pour ajuster les pratiques agricoles, telles que l'irrigation et l'application d'engrais, pour améliorer les rendements et réduire les coûts. [10]

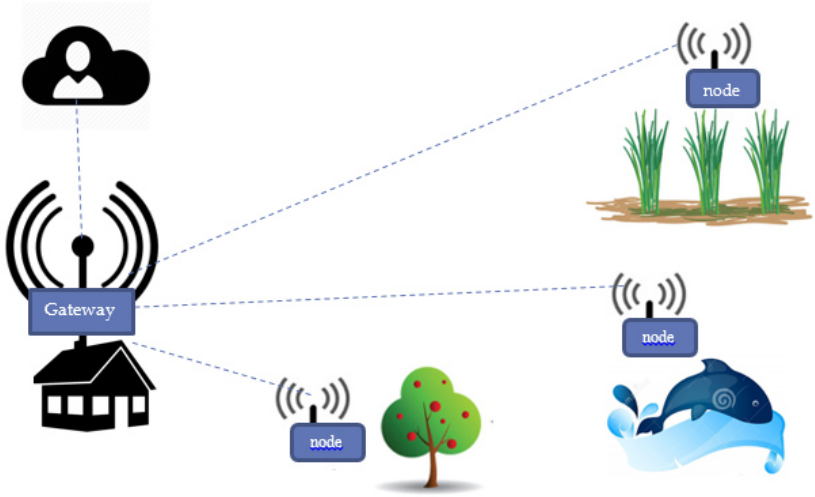


Figure I.9 : *Domaine agriculturale de RCSF* [10]

✓ **Systèmes de surveillance de la santé :** Les RCSF sont utilisés pour surveiller la santé des patients à distance. Les capteurs peuvent être utilisés pour surveiller des paramètres tels que la pression artérielle, la température corporelle et les niveaux de glucose. Les données collectées peuvent être utilisées pour diagnostiquer des maladies, suivre l'évolution de la maladie et ajuster les traitements. [10]

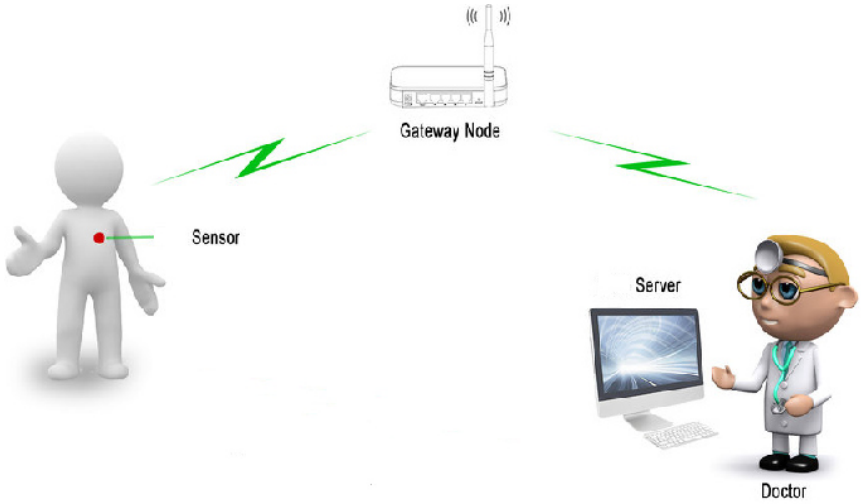


Figure I.10 : *Domaine de la santé de RCSF* [10]

✓ **Maintenance prédictive :** RCSF sont utilisés pour surveiller les équipements industriels afin de prédire les défaillances et d'effectuer une maintenance préventive. Les capteurs peuvent être déployés sur des machines industrielles pour surveiller des paramètres tels que la température, la pression et les vibrations. Les données collectées sont utilisées pour détecter des anomalies et prendre des mesures de maintenance préventive avant qu'une défaillance ne se produise. [10]

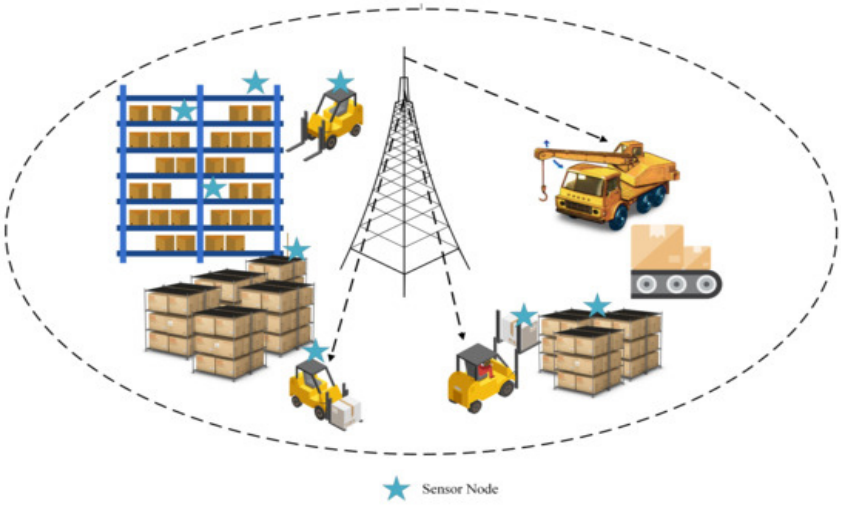


Figure I.11 : *domaine de maintenance de RCSF* [10]

✓ **Surveillance de la sécurité publique :** les RCSF sont utilisés pour la surveillance de la sécurité publique, notamment pour la surveillance des zones urbaines. Les capteurs sont déployés pour surveiller les zones à risque, telles que les zones de crime, les zones de circulation intense et les zones industrielles dangereuses. Les données collectées peuvent être utilisées pour détecter des incidents de sécurité et aider à prendre des mesures pour prévenir les incidents futurs. [10]

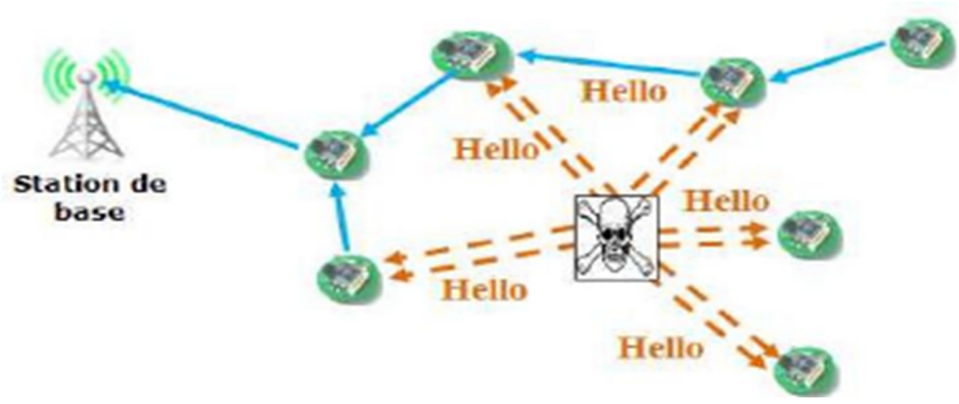


Figure I.12*: domaine sécuritaire de RCSF* [10]

I.7. Les avantages et les contraintes de RCSF

I.7.1. Les avantages de RCSF

- **Flexibilité :** Les RCSF peuvent être déployés dans une grande variété d'environnements et peuvent être configurés pour répondre à des besoins spécifiques, tels que la surveillance de l'environnement, la surveillance de la santé ou la surveillance industrielle. [1]
- **Scalabilité :** Les RCSF peuvent être constitués de milliers de nœuds de capteurs, ce qui permet de couvrir de grandes zones et de surveiller de nombreux paramètres simultanément. [11]
- **Faible coût :** Les RCSF sont souvent moins coûteux que les systèmes de surveillance traditionnels en raison de la simplicité de leur conception et de leur déploiement. [12]
- **Facilité de déploiement :** Les RCSF peuvent être rapidement déployés et installés dans des environnements difficiles d'accès ou dangereux pour les humains, tels que les centrales nucléaires ou les sites d'exploitation minière. [13]
- **Surveillance en temps réel :** Les RCSF peuvent fournir une surveillance en temps réel de l'environnement, permettant une réponse rapide à des événements tels que les catastrophes naturelles ou les incidents industriels. [14]
- **Collecte de données à haute résolution :** Les RCSF peuvent fournir des données à haute résolution sur de nombreux paramètres, permettant une analyse détaillée de l'environnement surveillé. [15]

I.7.2. Les contraintes de RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent présenter plusieurs problématiques, notamment :

✓ **La communication :** Les capteurs doivent communiquer entre eux pour transmettre les données collectées, mais les distances de transmission peuvent être limitées et les interférences peuvent entraîner des pertes de données. [1]

✓ **La sécurité :** Les données collectées par les capteurs peuvent être sensibles et doivent être protégées contre les attaques malveillantes. [1]

✓ **La localisation :** Les capteurs peuvent être déployés dans des environnements difficiles à localiser, ce qui peut rendre difficile la collecte des données de manière précise. [1]

✓ **La gestion de l'échelle :** Les RCSF peuvent être déployés sur de vastes territoires, ce qui peut rendre difficile la gestion de l'ensemble du réseau. [1]

✓ **L'interopérabilité :** Les différents capteurs utilisés dans un WSN peuvent utiliser des protocoles de communication différents, ce qui peut rendre difficile leur intégration et leur utilisation ensemble. [1]

✓ **La consommation d'énergie :** Les capteurs ont généralement des ressources limitées en termes de batterie, ce qui peut limiter leur durée de vie et leur capacité à effectuer des tâches complexes. [1]

Ces problématiques doivent être prises en compte lors de la conception, du déploiement et de l'utilisation d'un WSN pour garantir son efficacité et sa fiabilité.

I.8. La consommation d'énergie

La consommation d'énergie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) est l'un des principaux défis auxquels sont confrontés les concepteurs de ces réseaux. Les capteurs sont souvent alimentés par des batteries qui ont une durée de vie limitée.

- **Energie de capture :** L'énergie de capture est indispensable pour effectuer l'échantillonnage, le traitement du signal et la conversion analogique/numérique. Toutefois, elle ne constitue qu'une faible fraction de la consommation énergétique totale d'un nœud.
- **Energie de traitement :** se divise en deux composantes essentielles. La première est l'énergie de commutation, qui est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel. Cette énergie est consommée lors des opérations de commutation des signaux dans le circuit. La deuxième composante est l'énergie de fuite, qui représente la consommation d'énergie lorsque l'unité de calcul ne réalise aucun traitement spécifique. Il s'agit d'une consommation d'énergie inhérente au fonctionnement même du système, même en l'absence d'opérations de calcul actives.
- **L'énergie de communication :** se divise en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie d'émission. Cette dernière est influencée par la quantité de données à transmettre, la distance de transmission et les caractéristiques physiques du module radio. La capacité de transmission du signal dépend de la puissance d'émission : plus elle est élevée, plus la portée du signal est grande, mais cela se traduit également par une consommation d'énergie plus élevée.

Le schéma présenté dans cette figure représente un modèle simplifié dans lequel l'émetteur consomme de l'énergie pour faire fonctionner les dispositifs électroniques et l'amplificateur, tandis que le récepteur dissipe de l'énergie pour alimenter les appareils électroniques de la radio.

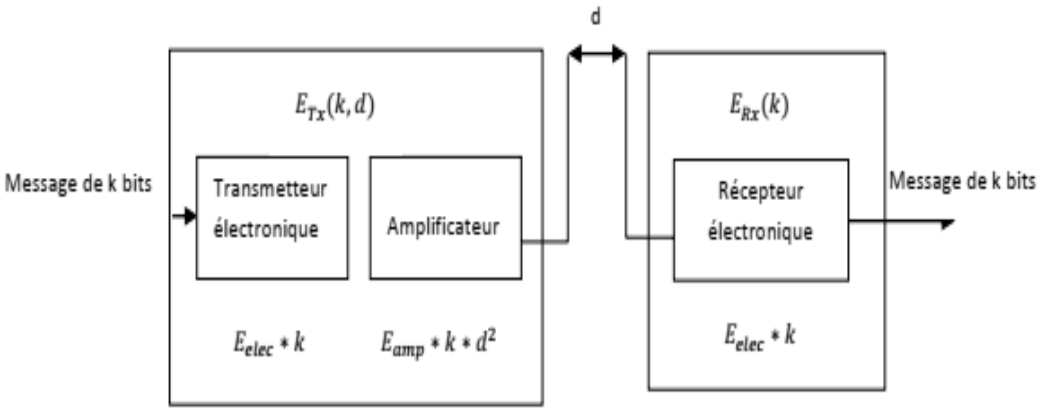


Figure I.13 *: Modèle de consommation d'énergie*

L'énergie requise par l'émetteur pour transmettre un message de k bits sur une distance de d mètres est donnée par la formule suivante :

$$E_{Tx}(k,d) = E_{Tx}(k) + E_{Tx\ amp(k,d)} \quad \textbf{I.1}$$

- Cette formule change par rapport à la distance d.

$$E_{Tx}(k,d) = \begin{cases} k \times E_{elec}(k,d) + k \times \varepsilon_{amp} \times d^2 & si\ d < dcrossover \\ k \times E_{elec}(k,d) + k \times \varepsilon_{amp} \times d^4 & si\ non \end{cases} \quad \textbf{I.2}$$

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

$$ER_x(k) = k \times E_{elec} \quad \textbf{I.3}$$

Avec :

- **E_{elec}** : énergie de transmission/réception électronique.
- **k** : taille d'un message.
- **d** : c'est la distance entre l'émetteur et récepteur.
- **$E_{Tx\ amp(k,d)}$** : énergie d'amplification.

- ε_{amp} **:** facteur d'amplification.
- **dcrossover :** distance limite pour que les facteurs de transmission changent les valeurs.

La consommation d'énergie dans les RCSF est liée à plusieurs facteurs, notamment :

- **La taille du réseau :** Plus le réseau est grand, plus la distance entre les capteurs est grande, ce qui peut entraîner une consommation d'énergie plus élevée.
- **La quantité de données collectées :** Plus les capteurs collectent de données, plus la consommation d'énergie est importante.
- **La transmission de données :** L'envoi de données d'un capteur à un autre nécessite une transmission sans fil, qui consomme de l'énergie.
- **La réception de données :** La réception de données par un capteur nécessite également de l'énergie.
- **La qualité du signal :** Si le signal est faible, les capteurs doivent utiliser plus d'énergie pour communiquer entre eux.

I.9. Conclusion

En conclusion de ce premier chapitre, nous avons introduit et expliqué les caractéristiques spécifiques de réseau de capteurs sans fil, Nous avons également souligné les avantages et les applications potentielles de cette technologie. Ce chapitre a posé les bases nécessaires pour comprendre les réseaux de capteurs sans fil et les défis spécifiques auxquels ils sont confrontés. Dans le chapitre suivant, nous aborderons plus en détail les protocoles de routage utilisés dans les WSN.

Chapitre II : Les protocoles de routage dans les WSN

II.1. Introduction

Les RCSF sont confrontés à des défis importants en matière de consommation d'énergie. Les nœuds des RCSF fonctionnent généralement sur des batteries, limitant ainsi leur durée de vie et leur capacité à fournir une transmission de données fiables. Pour résoudre ce problème, de nombreux protocoles ont été développés pour économiser l'énergie des nœuds. L'un de ces protocoles est LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) qui est un protocole de clustering efficace pour économiser l'énergie dans les RCSF.

Ce chapitre aborde les différents facteurs et contraintes à prendre en compte lors de la conception des RCSF. Nous présentons les protocoles de routage utilisant des approches de routage hiérarchique, qui ont été développés pour optimiser la gestion de l'énergie dans les RCSF.

II.2. Le routage dans les RCSF

Le routage est l'un des aspects les plus importants, car il détermine la manière dont les données sont acheminées de nœud en nœud jusqu'à leur destination final.

Les protocoles de routage peuvent être classés entre eux selon Quatre critères :

II.2.1. Le mode de fonctionnement du protocole : Le mode de fonctionnement est la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau [16] :

- **Routage basé sur les multi-chemins :** Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau.
- **Routage basé sur les requêtes :** La station de base génère des requêtes afin d'interroger les capteurs. Lorsqu'un nœud demandeur a besoin des données spécifiques, les nœuds contenant ces données doivent les transmettre en empruntant le chemin inverse de la requête. De plus, la station de base a la capacité d'émettre des requêtes ciblées vers des régions spécifiques du réseau, afin d'obtenir les données souhaitées.
- **Routage basé sur la négociation :** Les RCSF peuvent faire face à un problème de redondance lorsque plusieurs nœuds détectent le même phénomène et inondent le réseau avec des paquets de données identiques. Pour résoudre ce problème, il est possible d'utiliser ces protocoles qui permettent aux nœuds capteurs de collaborer et de négocier entre eux afin de réduire la redondance des données transmises, assurant ainsi une utilisation plus efficace des ressources réseau.

- **Routage basé sur la qualité de service :** le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le RCSF doit satisfaire certaines métriques de QoS. Les protocoles de cette approche sont très recommandés pour les applications orientées surveillance.

II.2.2. Le paradigme de communication : la façon dont les nœuds sont interrogés dans un RCSF. Dans ce domaine, on distingue trois principaux paradigmes de communication :

- **Centré nœuds :** utilisé dans les réseaux conventionnels, nécessite l'identification et la connaissance préalable des nœuds avec lesquels communiquer, à travers des adresses MAC ou IP par exemple. Ce mode de communication reste efficace dans les réseaux de petite taille où l'interrogation individuelle des capteurs est possible.
- **Centré-données :** Le routage se fait suivant les données disponibles au niveau des capteurs. Ces données seront propagées de proche en proche pour y arriver à la station de base.
- **Basé-localisation :** Dans cette technique, les décisions de routage sont établies selon la position des nœuds. Un tel type de routage nécessite que les nœuds aient connaissance de leurs positions géographiques.

II.2.3. Le mode d'établissement de la route

- **Les protocoles de routage Proactifs :** Sont des protocoles qui fonctionnent selon des intervalles réguliers, ils sont plutôt destinés aux applications nécessitant un suivi périodique des données [18]
- **Les protocoles de routage Hybride :** combinent les avantages des protocoles de routage proactifs et réactifs, assurant ainsi un équilibre entre réactivité et conservation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. [19]
- **Les protocoles de routage Réactif :** Sont des protocoles qui assurent une réaction instantanée aux changements soudains et brusques. Il est ainsi préconisé pour les applications dites à contraintes temporelles [20]

II.2.4. La topologie du réseau : c'est la structure et l'organisation des nœuds capteurs dans le réseau [5] :

- **La topologie plate dans le routage :** signifie que tous les nœuds capteurs sont sur le même niveau et ont des responsabilités équivalentes. Chaque nœud participe activement au routage

des données, ce qui peut entraîner une consommation d'énergie inégale et une charge de communication élevée.

- **La topologie hiérarchique dans le routage :** implique l'organisation des nœuds capteurs en niveaux hiérarchiques. Certains nœuds agissent comme des nœuds intermédiaires ou des CHs et sont responsables de l'agrégation et du transfert des données. Cela permet une meilleure gestion de l'énergie, une réduction de la charge de communication et une amélioration de la scalabilité du réseau.

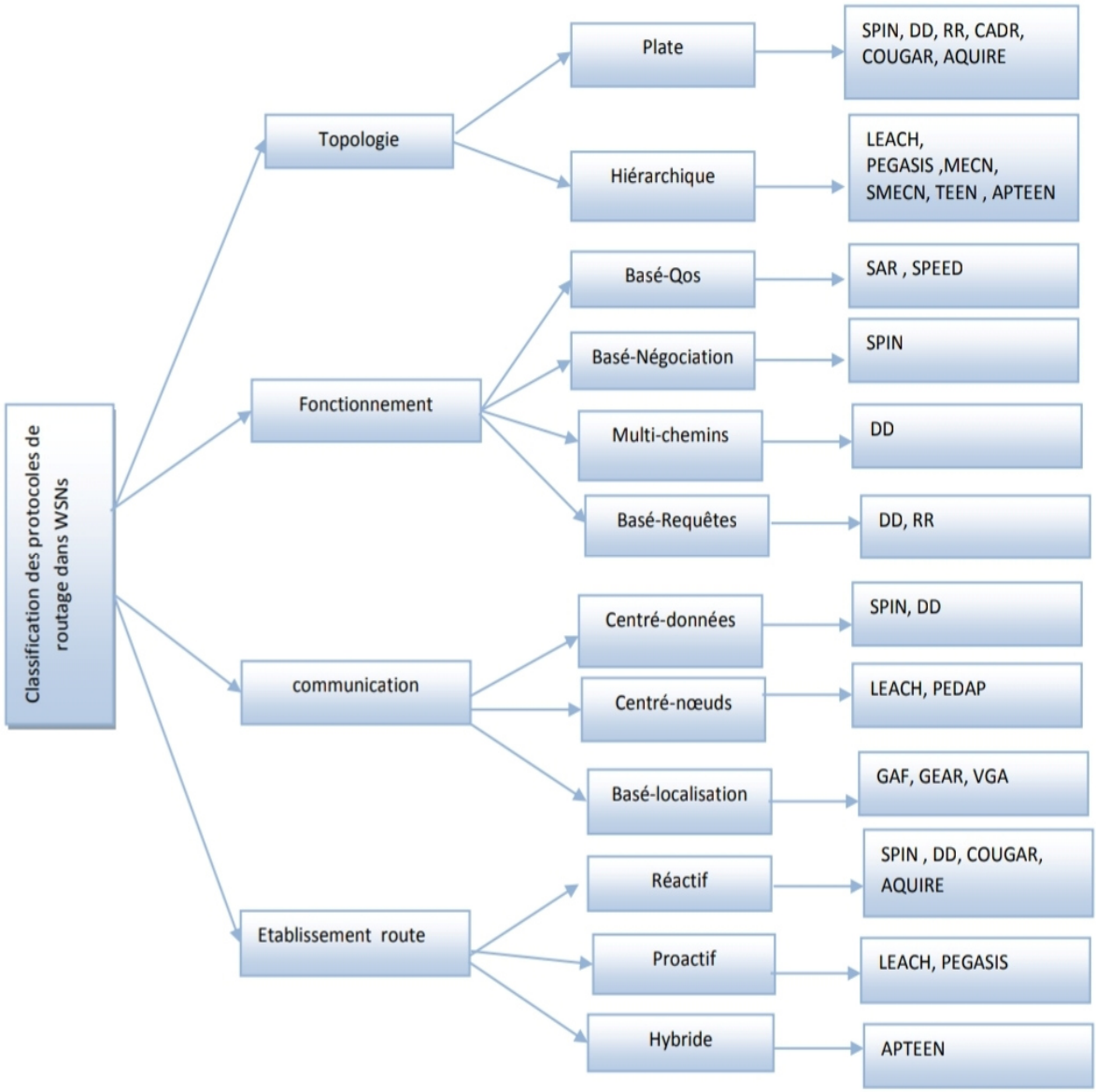


Figure II.1 *: Classification des protocoles de routage pour les RCSF* [5]

II.3. Caractéristiques de topologie hiérarchique

II.3.1. La typologie des clusters générés : Les algorithmes de clustering utilisés peuvent générer deux types de clusters différents [1] :

- **Clusters disjoints :** chaque nœud appartient à un seul cluster et à un seul cluster uniquement.
- **Clusters interconnectés :** Ce type de clustering permet aux nœuds d'appartenir simultanément à un ou plusieurs clusters.

II.3.2. Approches de l'algorithme de clustering : les algorithmes de clustering peuvent être classés en trois approches basées sur le type d'algorithme de contrôle utilisé [24] **:**

- **Centralisé :** l'exécution se fait sur un nœud qui possède une vue globale du réseau, généralement situé au niveau du SB. C'est ce nœud qui coordonne les opérations de clustering.
- **Distribué :** l'exécution se fait en coopération entre chaque nœud du réseau. Les tâches de contrôle sont synchronisées par l'échange de messages de contrôle entre les nœuds.
- **Géographique :** la tâche de contrôle exécutée par un nœud dépend de sa position géographique. Les décisions prises par les nœuds sont influencées par leur emplacement physique dans le réseau.

II.3.3. La communication intra-cluster : se produit entre le nœud CH et les autres nœuds membres du même cluster [1] :

- **Communication point à point (single-hop) :** ce type de communication permet à deux nœuds capteurs de communiquer directement entre eux. Cela peut être utile pour transmettre des données spécifiques ou des commandes de contrôle entre deux nœuds capteurs.
- **Communication multipoint (multi-hop) :** dans ce type de communication, plusieurs nœuds capteurs peuvent communiquer avec un nœud central ou un concentrateur. Le nœud central peut collecter les données de plusieurs nœuds capteurs et transmettre ces données à un SB ou un système de surveillance.

II.3.4. La communication inter-cluster [1] : les CHs peuvent établir une communication avec la SB de deux manières différentes :

- **Communication directe avec la station de base :** Les CHs peuvent communiquer directement avec la SB sans avoir besoin de passer par d'autres nœuds intermédiaires. Cette méthode permet une transmission rapide des données, mais elle peut entraîner une consommation d'énergie plus élevée pour les CHs situés à une plus grande distance de la SB.
- **Communication multi-sauts via des nœuds Gateway :** Les nœuds Gateway jouent le rôle de relais pour la transmission des données entre les CHs et la SB. Ces nœuds peuvent être des nœuds CH ou des nœuds membres du cluster. L'utilisation de la communication multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie globale en évitant une communication directe à longue distance entre les CHs et la SB. De plus, cela rend le réseau plus extensible car les nœuds Gateway peuvent faciliter la communication entre les clusters éloignés.

II.3.5. L'agrégation des données [1] : peut se faire à chaque nœud ou au niveau des CHs dans un réseau clustérisé. Elle vise à réduire la taille des données échangées et la consommation d'énergie. L'agrégation à chaque nœud diminue la quantité de données transmises, tandis que l'agrégation au niveau des CHs réduit davantage la quantité de données échangées. Le choix dépend des besoins du réseau en termes de quantité de données, de bande passante et de ressources énergétiques. L'objectif est d'optimiser l'équilibre entre l'efficacité énergétique et la précision des données transmises.

II.3.6. Le processus de réélection des CHs [24] : Les CHs consomment davantage d'énergie que les autres nœuds du réseau en raison de leurs fonctions de coordination et d'agrégation des données. Cela crée un déséquilibre énergétique sur le réseau. Pour y remédier, une réélection des CHs est effectuée périodiquement ou en fonction de leur consommation d'énergie. Ce processus permet de redistribuer la charge énergétique et de prolonger la durée de vie du réseau. Les critères de réélection peuvent varier, tels que le niveau d'énergie restant ou la proximité géographique. Ainsi, le réseau maintient un équilibre énergétique optimal et un fonctionnement efficace.

II.4. Le protocole LEACH

II.4.1. Définition

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un protocole de routage distribué pour les RCSF. Il utilise une architecture de clustérisassions pour réduire la consommation d'énergie des nœuds capteurs et prolonger la durée de vie du réseau.

II.4.2. Architecture de LEACH

L'architecture de LEACH est basée sur un regroupement de nœuds capteurs en clusters, où chaque cluster est géré par un CH qui sont sélectionnés de manière aléatoire parmi les nœuds capteurs et sont responsables de la collecte et de l'agrégation des données des nœuds de leur cluster. Les données agrégées sont ensuite transmises au nœud de destination.

Le protocole LEACH utilise une approche de clustérisassions dynamique, ce qui signifie que les CH sont sélectionnés à chaque cycle de communication. Cette approche permet de distribuer équitablement la charge de travail et de prolonger la durée de vie des nœuds capteurs en évitant que les mêmes nœuds ne soient sollicités de manière répétitive. [21]

II.4.3. Principe de fonctionnement de LEACH

Le protocole LEACH fonctionne en deux phases principales : la phase de configuration et la phase de transmission de données :

- **La phase d'Initialisation de LEACH (set up)** : est la première étape du protocole. Elle permet de sélectionner les nœuds qui vont jouer le rôle de CH pour la ronde en cours. Cette sélection est effectuée de manière aléatoire, avec une probabilité qui dépend du niveau d'énergie du nœud. Voici les étapes de la phase d'Initialisation de LEACH :

- **Configuration :** Chaque nœud capteur du réseau choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1 pour déterminer sa probabilité d'être sélectionné comme CH. Cette probabilité est notée p.
- **Annonce de la probabilité :** Chaque nœud diffuse sa probabilité p à tous les autres nœuds du réseau.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p\times(r \bmod \frac{1}{p})} & si\ n \in G \\ 0 & sinon \end{cases} \qquad \textbf{II.1}$$

- p : est le pourcentage de CH (p = 0,05 pour une condition optimale).
- r : représente le tour courant.
- G : les nœuds qui n'ont pas été CHs lors des (1/p) tours précédents.

- **Sélection des CHs :** Les nœuds choisissent de manière aléatoire un nombre aléatoire r dans [0,1] et sélectionnent eux-mêmes comme CH si leur probabilité p est supérieure à r. Mathématiquement, cela peut être représenté par l'équation suivante :

  - si p > r, alors le nœud devient un CH.

  - sinon, le nœud devient un nœud ordinaire.



Figure II.2 : *La phase de configuration de LEACH* [21]

- **Formation des clusters :** Les nœuds choisissant de devenir CH deviennent les centres de leurs propres clusters et ils diffusent leur identité aux nœuds ordinaires environnants. Chaque nœud ordinaire choisit le CH le plus proche pour rejoindre son cluster.

  En utilisant cette méthode de sélection aléatoire, la probabilité qu'un nœud devienne un CH change à chaque cycle, de sorte que chaque nœud a la même chance de devenir un CH. Cette méthode garantit également une répartition équitable des charges de communication et de traitement entre les nœuds dans le réseau.

➢ **La phase de transmission de données** : la phase de transmission de données utilise la technique d'accès multiple au canal TDMA (Time Division Multiple Access) pour permettre aux nœuds capteurs de transmettre leurs données de manière ordonnée et d'éviter les collisions.

Le TDMA est utilisé pour allouer des créneaux de temps aux nœuds capteurs de chaque cluster, afin qu'ils puissent transmettre leurs données dans leur créneau de temps alloué sans perturber les autres nœuds du même cluster. Cette technique permet de réduire les collisions et de maximiser l'utilisation du canal, en réduisant le temps de transmission des données et en économisant l'énergie des nœuds capteurs.

La phase de transmission de données dans LEACH est donc étroitement liée à l'utilisation de TDMA, car c'est cette technique qui permet de répartir le temps de transmission de manière efficace et équitable entre les différents nœuds capteurs du réseau.

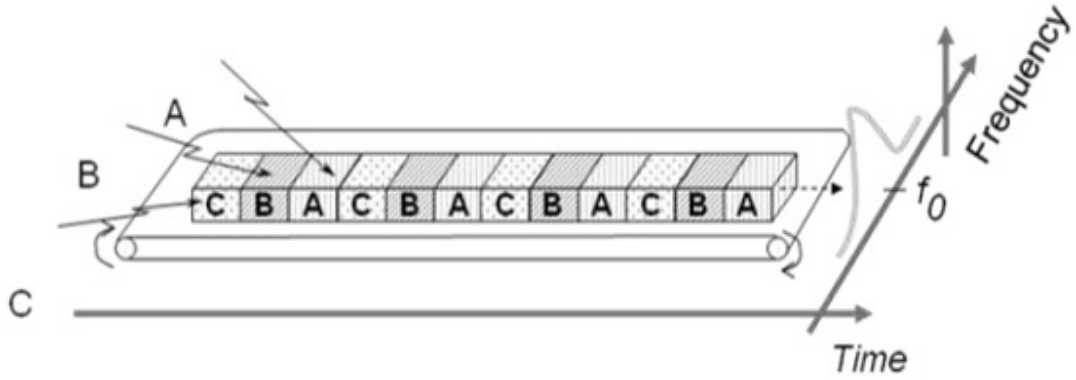


Figure II.3 : *canal TDMA (Time Division Multiple Access)* [22]

II.5. Avantages et inconvénients du protocole LEACH

➢ **Avantages :** Le protocole LEACH présente les avantages suivants : [22]

- **Algorithme distribué** : l'autoconfiguration des clusters se fait indépendamment de la SB. Rotation des rôles de CH : les CH sont choisis de façon aléatoire et périodique parmi les nœuds formant le cluster ce qui empêche la forte consommation d'énergie pour la transmission des données.
- **Faible énergie pour l'accès au média :** Le mécanisme de groupes permet aux nœuds d'effectuer des communications sur des petites distances avec leurs CH.
- **Agrégations des données :** Les CHs compressent les données arrivant de leurs membres, et envoient un paquet d'agrégation au nœud puits afin de réduire la quantité d'informations qui doit lui être transmise.

➢ **Inconvénients** : Le protocole LEACH présente les inconvénients suivants : [22]

- **Absence des CHs** : On pourra ne pas avoir des CHs durant un round si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité Pi(t).
- **La distance entre le CH et les autres nœuds :** Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport aux plus proches.
- **Diminution de l'énergie des nœuds :** cette diminution est due à l'utilisation d'une communication à un seul saut au lieu d'une communication multi-sauts.
- **La rotation des CHs :** c'est une méthode qui n'est pas efficace pour de grandes structures de réseaux à cause de la surcharge d'annonces engendrées par le changement des CHs, et qui réduit le gain d'énergie initial.

II.6. SEP (Stable Election Protocol) :

Pour améliorer l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs, Smaragdakis et AL ont introduit le protocole SEP, qui s'appuie sur LEACH. Ils ont été parmi les premiers à reconnaître l'impact de l'hétérogénéité énergétique des nœuds dans les RCSF. Pour tenir compte de cette hétérogénéité, ils ont attribué à chaque nœud une probabilité pondérée en fonction de son niveau d'énergie pendant l'évolution du réseau. Cette approche pivote le CH pour adapter la probabilité d'élection aux paramètres hétérogènes. Les auteurs ont exploité les capacités de LEACH pour développer un modèle adaptatif et bien distribué capable de gérer l'énergie supplémentaire introduite dans le réseau, qui est une source d'hétérogénéité. Dans le modèle de routage SEP, deux types de nœuds avec différents niveaux d'énergie sont utilisés, ce qui crée un RCSF hiérarchique à deux niveaux de communication

à saut unique. Les nœuds sont supposés être statiques et uniformément répartis dans la zone de détection. [23].

- **Architecture de SEP**

Les protocoles de groupement tels que LEACH ont été largement utilisés en présence d'hétérogénéité énergétique dans les RCSF. Cependant, le premier nœud qui meurt peut causer une instabilité du système et rendre le processus de groupement peu fiable [23].

Pour résoudre ce problème, les auteurs de SEP ont proposé une nouvelle méthode pour la définition de l'époque du réseau de capteurs. Cette méthode utilise deux types de nœuds **: les nœuds normaux (ordinaires) et les nœuds avancés**. Les nœuds avancés ont un facteur d'énergie α supérieur à celui des nœuds ordinaires. Selon le modèle SEP, les nœuds avancés occupent davantage de positions de CH que les nœuds ordinaires pendant la même époque. La nouvelle méthode de définition de l'époque est égale :

$$\frac{1}{P_{opt}}(1 + \alpha \times m) \qquad \textbf{II.2}$$

Le protocole SEP utilise une méthode de probabilité d'élection pour choisir les nœuds CH en se basant sur l'énergie initiale de chaque nœud. Cette méthode attribue une valeur de probabilité égale à l'énergie initiale de chaque nœud, divisée par l'énergie initiale des nœuds normaux. Les valeurs de probabilité associées aux nœuds normaux et avancés dans SEP sont choisies pour refléter l'énergie supplémentaire introduite dans le système de réseau. Les valeurs de probabilité et l'énergie initiale totale sont données par :

- Pour : s est un nœud normal $P_{nrm} = \frac{P_{opt}}{1+\alpha \times m}$ **II.3**
- Pour : s est un nœud avancé $P_{adv} = \frac{P_{opt}}{1+\alpha \times m} \times (1 + \alpha)$ **II.4**
- $E_t = nE_0(1 + m\alpha)$ **II.5**

Avec :

- **P_{nrm} :** la probabilité pondérée pour les nœuds normaux.
- **P_{avn} :** la pondération probabilité pour les nœuds avancés.
- **m :** la proportion des nœuds avancés.
- **α:** fois plus d'énergie que les nœuds normaux et enfin
- **E_{tot} :** l'énergie initiale totale du réseau.

II.7. Conclusion

En conclusion du chapitre, nous avons exploré le domaine du routage dans les RCSF, en mettant l'accent sur le routage hiérarchique. Nous avons examiné les protocoles LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) et SEP (Stable Election Protocol) et évalué leurs avantages et inconvénients respectifs. LEACH offre une répartition équilibrée de l'énergie avec une faible complexité, tandis que SEP offre une meilleure stabilité en sélectionnant les Cluster Heads selon leur énergie et position. Dans le prochain chapitre, nous réalisons la simulation de ces protocoles pour évaluer leurs performances en termes de consommation d'énergie. Cette étape de simulation nous aidera à prendre des décisions éclairées pour la conception et l'optimisation des RCSF, en sélectionnant le protocole de routage le plus adapté à nos besoins spécifiques.

Chapitre III : Impacte de déplacement de la station de base dans un WSN

III.1. Introduction

Le protocole LEACH est l'un des protocoles les plus populaires pour les réseaux de capteurs sans fil (WSN). Il utilise une approche basée sur le clustering pour prolonger la durée de vie du réseau en répartissant la charge de communication entre les nœuds. Cependant, une limitation majeure de ce protocole est son utilisation de nœuds homogènes, qui ont des caractéristiques similaires en termes de consommation d'énergie et de puissance de transmission. Pour pallier cette limitation, des variantes du protocole LEACH ont été proposées, notamment le protocole LEACH hétérogène et SEP.

Dans ce chapitre, nous comparons les performances des protocoles LEACH homogène et hétérogène, ainsi que le protocole SEP, dans des scénarios de déplacement de la station de base le long de différents trajets. Nous examinons comment ces protocoles se comportent dans des environnements dynamiques et comment ils gèrent la répartition de la charge de communication entre les nœuds. Nous analysons également l'impact de la mobilité de la station de base sur la durée de vie de la batterie des nœuds.

En autre, cette étude comparative offre des perspectives importantes sur les avantages et les limitations des protocoles LEACH homogène et hétérogène, ainsi que du protocole SEP, dans des environnements dynamiques. Ces résultats pourraient aider à la conception et à l'optimisation des réseaux de capteurs sans fil dans des scénarios réels.

III.2. La simulation dans les réseaux de capteurs sans fil

III.2.1. Besoin de simulation

En raison de leur coût élevé et de leur complexité, il n'est souvent pas possible de déployer et de maintenir des réseaux de capteurs réels pour tester les différentes solutions d'implémentation sur des plateformes à grande échelle.

Pour cette raison, les outils de simulation sont de plus en plus utilisés pour évaluer les performances des réseaux de capteurs sans fil (WSN). Il existe trois méthodes pour évaluer le bon fonctionnement et les performances d'un système : la méthode analytique, la méthode par simulation et la méthode par mesure sur un système réel existant. La méthode de simulation consiste à mettre en place un modèle du système à évaluer à l'aide d'un logiciel de simulation approprié. Elle offre l'avantage de simuler de manière plus réaliste le comportement du système à évaluer, contrairement aux méthodes analytiques.

En outre, elle permet de visualiser les résultats sous forme de graphiques faciles à analyser et à interpréter. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser la simulation pour tester le bon fonctionnement et évaluer les performances de notre algorithme de clustering avec station de base mobile.

Nous avons opté pour l'utilisation du simulateur MATLAB, qui est le simulateur le plus répandu dans le milieu universitaire. Ce simulateur se distingue par son code source ouvert, qui permet aux chercheurs d'évaluer leurs contributions à chaque étape du processus, favorisant ainsi l'amélioration de la recherche dans ce domaine.

III.2.2. Le programme MATLAB

MATLAB (MATRIX LABORATORY) est une plateforme de calcul numérique et de programmation utilisée par des millions d'ingénieurs et de scientifiques pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles associe un environnement de bureau, conçu pour l'analyse par itération et les processus de conception avec un langage de programmation permettant d'exprimer directement les mathématiques sous forme de tableaux et de matrices [25]

Développé par la société The Math Works, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java. Une interface en ligne de commande est un des éléments du bureau MATLAB qui permet d'exécuter des commandes simples. Des séquences de commandes peuvent être sauvegardées dans un fichier texte typiquement avec l'éditeur MATLAB, sous la forme d'un « script » ou encapsulé dans une fonction. [26]

III.2.3. Les Scénarios de la simulation

Les simulations sont effectuées en utilisant trois protocoles différents, chacun ayant quatre scenarios d'infrastructures virtuelles pour la trajectoire de la station de base (fixée au centre, aléatoire dans le champ, mobile le long du périmètre du champ, mobile sur la diagonale du champ). Nous avons utilisé le protocole LEACH pour l'auto-organisation et le routage hiérarchique des données comme référence d'évaluation et nous l'avons comparé aux deux protocoles : LEACH hétérogène et SEP.

Le code MATLAB implémente ces protocoles pour les réseaux de capteurs sans fil avec une station de base ayant des trajectoires différentes dans le champ. Il inclut la définition des paramètres du

protocole, tels que la taille de la zone de déploiement, le nombre de nœuds, l'énergie initiale et la consommation d'énergie pour la transmission/réception.

Le code crée ensuite le réseau de capteurs de manière aléatoire, représentant les nœuds par des cercles **(O)** et les nœuds avancés par un signe plus **(+),** tandis que la station de base est représentée par un carré vert **([])** et les CHs par des cercles ont des étoiles à l'intérieur **(✦)**. Les nœuds avancés ont une énergie initiale supérieure à celle des nœuds normaux.

Ensuite, le protocole implémente l'algorithme de clustering, où chaque nœud peut devenir un chef de cluster avec une certaine probabilité (selon le protocole). Les nœuds envoient ensuite leurs données à leur chef de cluster respectif, qui agrège les données et les transmet au puits.

Le code suit la consommation d'énergie et génère des graphiques montrant le nombre des nœuds mort à : « **1%, 50% et 100%** » (**FND :** le premier nœud mort, **HND :** la moitié des nœuds mort, **LND :** le dernier Node mort, ainsi que la durée de vie du réseau. La durée de vie du réseau est définie comme le nombre de tours jusqu'à ce que toutes les batteries des nœuds soient épuisées.

III.2.4. La modélisation du réseau :

La comparaison entre les protocoles « LEACH homogène ; LEACH hétérogène et SEP » avec une station de base fixée et mobile est réalisée sur un réseau de capteurs sans fil de 100 nœuds fixe déployés sur une zone carrée de surface (100*100) m^2, ce réseau est considéré :

Homogène : Tous les nœuds du réseau sont semblable, en ce qui concerne, les caractéristiques techniques et l'énergie initiale (E_0) lors de l'utilisation du protocole LEACH homogène.

Hétérogène : les nœuds du réseau sont constitués par deux types à des caractéristiques techniques semblables lors de l'utilisation des protocoles LEACH hétérogène et SEP

- Le 1er type : constitué par m∗n nœuds appelés nœuds avancés (Advanced Node).

- Le 2eme type : constitué par (1-m)∗n nœuds appelés nœuds normaux.

Avec n : Le nombre total des nœuds du réseau.

m : La fraction (Pourcentage) des nœuds avancés.

Non uniforme : Les nœuds du réseau sont déployés d'une manière aléatoire sur la zone de captage.

Statique : Les nœuds sont immobiles durant toutes les simulations, et avec ces hypothèses :

- Le rayon de transmission est supposé fixe et semblable pour tous les nœuds du réseau.

- La consommation de l'énergie lors de l'envoi et la réception d'un message est la même.

- La distance, séparant deux nœuds, peut être calculée selon la force du signal reçu.

- Les nœuds du réseau ne disposent d'aucun dispositif de géolocalisation.

- Tous les nœuds sont considérés comme sources de données avec un prélèvement et une dissémination périodique.

Mobilité : La station de base prend quatre formes géométriques qui seront décrites par la suite.

L'énergie initial :

- L'énergie initiale d'un nœud normal est égale à E_0.

- L'énergie initiale d'un nœud avancé est égale à $E_0 (1+a)$.

Avec : a : Le facteur supplémentaire d'énergie entre un nœud normal et nœud avancé.

III.2.5. Critères d'évaluation

L'objectif des simulations est d'évaluer et analyser les protocoles proposés selon trois critères : la stabilité du réseau, l'énergie consommé pendant la période de stabilité et la durée de vie de chaque réseau dans les différents scénarios.

- **Stabilité du réseau :** la durée jusqu'à l'épuisement du premier nœud du réseau
- **L'énergie consommé :** l'énergie consommée pendant la période de stabilité du réseau.
- **La durée de vie** : la durée jusqu'à l'épuisement du dernier nœud du réseau

III.2.6. Les Paramètres de simulation

Les simulations ont été effectuées en utilisant les paramètres du protocole LEACH pour assurer une comparaison juste entre les différents scénarios ; le tableau **(III.1)** résume les paramètres**.**

Tableau III.1 : *les paramètres de simulation*

Les Paramètres	Les Valeurs
Le nombre des nœuds Total (N)	100
Surface (Xm*Ym, L longueur du réseau)	100x100 m^2
L'énergie initiale pour un nœud	0.5 J
La position de la station de base	Fixe et Mobile
La taille des messages de données	4000 bit
L'énergie consommée pour la transmission « **ETX** »	50 nJ/bit
L'énergie consommée pour la réception « **ERX** »	50 nJ/bit
Le facteur d'amplification du signal (**Efs)** pour « **d<=d_0** »	10pJ/bit
Le facteur d'amplification du signal (**Emp)** pour « **d>d_0** »	0.0013pJ/bit
Distance seuil (d_0)	87.705801930702930 m
L'énergie d'agréation (EDA)	5nJ
L'énergie totale de system(E)	50 J / 65 J
Valeur pour Les nœuds avancés (m, a)	m=0.3, a=1
La probabilité d'être CH (P)	10%

III.2.7. Equations de simulation de déplacement de la station de base

La trajectoire de la station de base dans le champ de captage est assurée par le modèle suivant :

$$\mathbf{Y = ax + b}$$

$$\mathbf{X = \pm V\, r + d}$$

$$\mathbf{d = r\, v}$$

Avec :

(X, Y) : les cordonnées instantanée de la station de base

a : la pente du droit.

b : la position initiale de la station de base.

v : la vitesse de la station de base constante .

r : round (tour).

d : la distance totale balayée par la station de base.

Xm : la longueur du champ de captage.

Ym : la largeur du champ de captage.

Les différents déplacements de la station de base sont présentés par ces équations :

1. **Station de base fixée au centre du champ de captage :**

Dans ce cas, la position de la station de base reste constante au centre du champ. Les équations pour cette trajectoire sont simplement :

X = 0.5*Xm

Y = 0.5*Ym

2. **Déplacement aléatoire de la Station de base dans le champ de captage :**

La station de base se déplace d'une manière aléatoire à l'intérieur du champ de captage. Supposons que les coordonnées aléatoires soient générées dans une plage spécifique définie par Xm et Ym :

X = rand*Xm « position en X aléatoire »

Y = rand*Ym « position en Y aléatoire »

- ✓ La fonction MATLAB **rand** génère des tableaux de nombres aléatoires dont les éléments sont uniformément répartis dans l'intervalle [25]

3. **Station de base se déplaçant sur le périmètre :**

Dans ce scénario, la station de base se déplace autour du périmètre du champ de captage. Supposons que le périmètre soit défini par les coordonnées (Xm, Ym). Les équations pour cette trajectoire sont :

X = randi ([0, 1], 1) *Xm +(randi ([0, 1], 1))

Y = randi ([0, 1], 1) +randi ([0, 1], 1) * Ym

- ✓ La fonction MATLAB **randi** est utilisée pour créer des tableaux bidimensionnels ou multidimensionnels de valeurs entières aléatoires. [25]

4. Station de base avec une trajectoire diagonale dans le champ de captage :

Cette trajectoire implique un mouvement de la station de base dans la diagonal du champ de captage. Supposons que la distance totale balayée soit d et que Xm et Ym soient la longueur et la largeur du champ de captage respectivement. Les équations pour cette trajectoire sont :

Y= a*Xm et X = r +d

Les équations sont résumées dans le tableau **(III.2)**

Tableau III.2 : *les équations de simulation*

La trajectoire la station de base	**Equation de trajectoire**
La sb fixée au centre	X=0.5*Xm/ Y=0.5*Ym
La SB aléatoire	X=rand*Xm/ Y=rand*Ym
La SB sur le périmètre	X=randi ([0, 1], 1) *Xm +(randi ([0, 1], 1)) / Y=randi ([0, 1], 1) +randi ([0, 1], 1) * Ym
La SB sur la diagonale	Y= a*Xm et X = r +d

III.3. Résultats de simulation

Les simulations ont été faites pour un réseau homogène en utilisant le protocole LEACH et un réseau hétérogène en utilisant le protocole (LEACH hétérogène et SEP).

Pour chaque scénario on détermine la géométrie de la trajectoire de la station de base (fixe au centre, aléatoire, au long du périmètre, sur la diagonal). L'objectif était de montrer l'évolution des métriques d'évaluation. Les résultats de simulation sont présentés par des courbes qui montrent l'évolution de la stabilité, l'énergie consommé a la stabilité et la durée de vie du réseau en fonction de la géométrie de la trajectoire de la station de base.

III.3.1. Résultats de simulation pour le premier scenario

❖ **La station de base fixe au centre**

On a adopté les protocoles LEACH (homogène et hétérogène) et SEP, on a simulé une station de base fixée au centre du champ de captage. Les figures **(III.1)** **(III.2)** montrent l'environnement de la simulation :

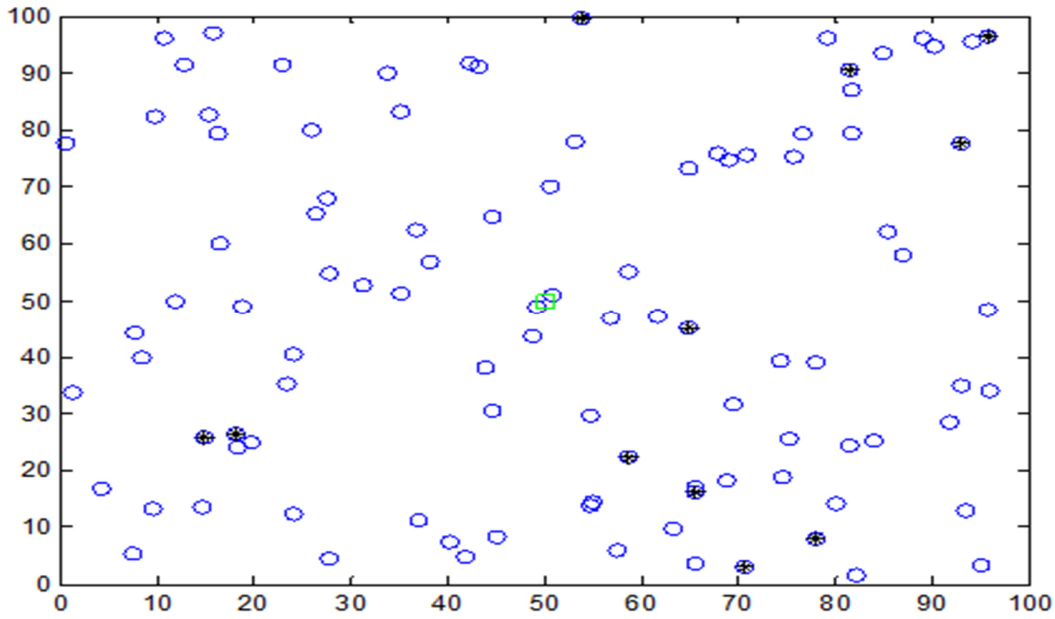


Figure. III.1 : *SB fixé au centre dans un WSN homogène*

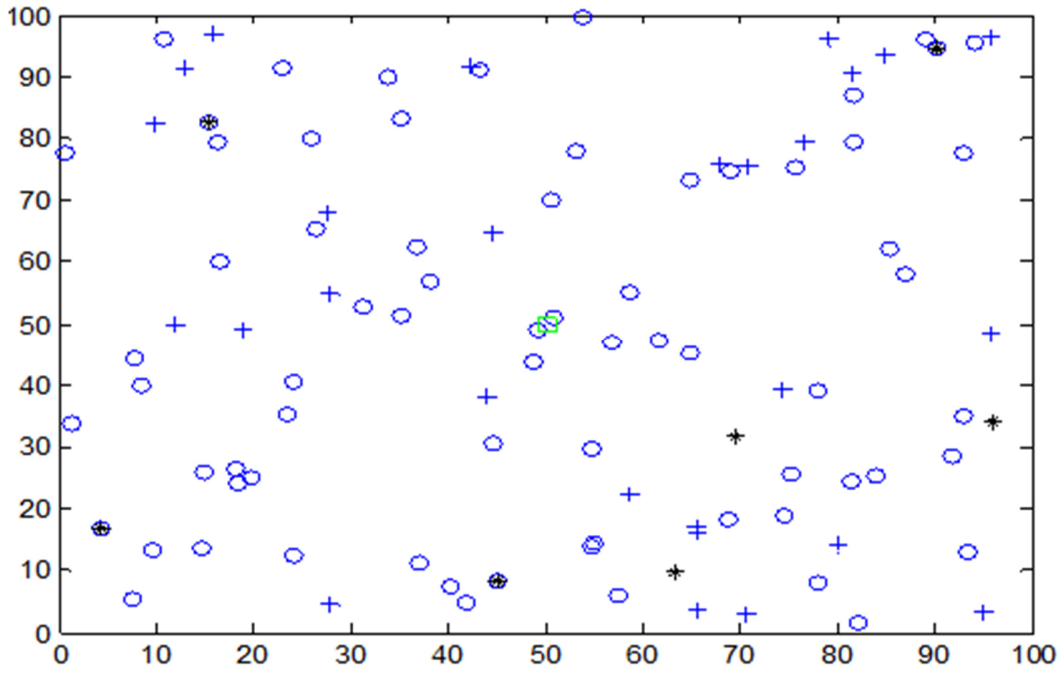


Figure. III.2 : *SB fixé au centre dans un WSN hétérogène*

- **La stabilité**

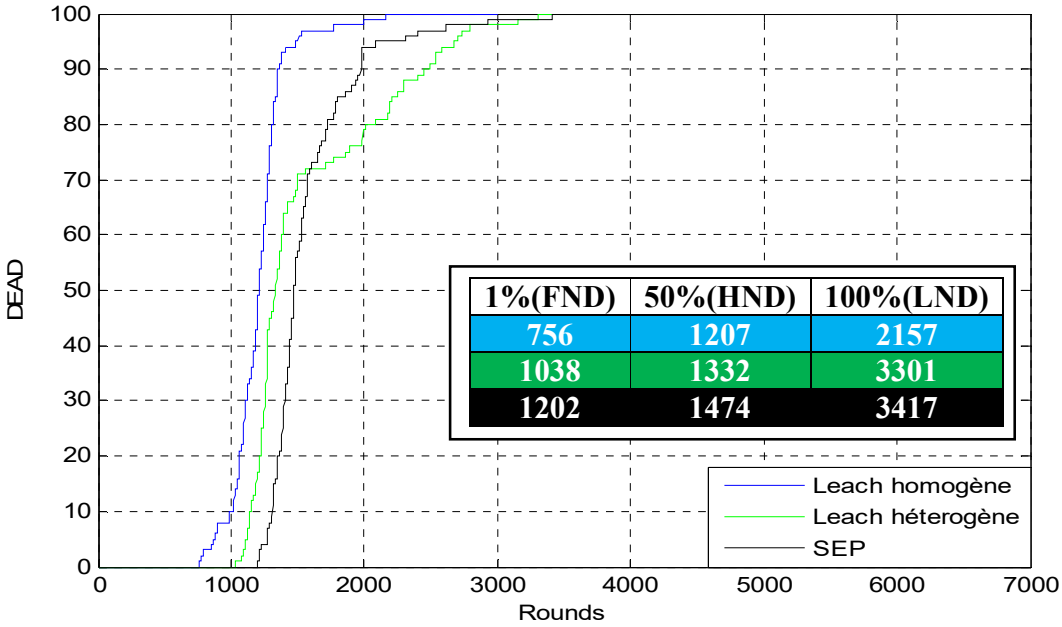


Figure. III.3: *stabilité dans un WSN (homogène et hétérogène) avec une SB fixée au centre*

- **L'énergie consommée pendant la stabilité**

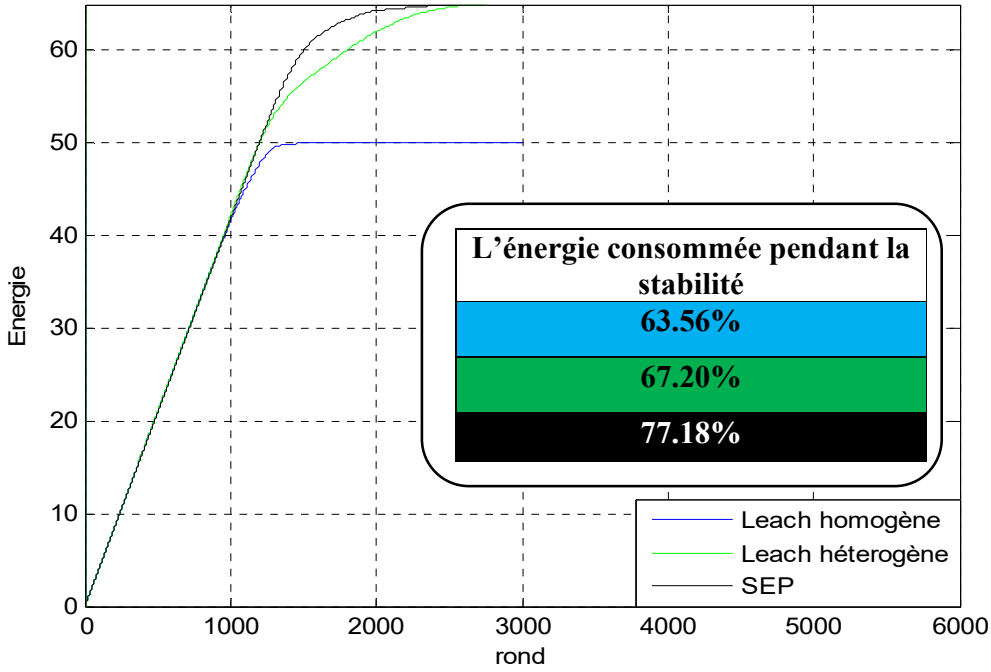


Figure. III.4: *énergie consommée pendant la stabilité par une SB fixée au centre avec les trois protocoles*

III.3.2. Résultats de simulation pour le deuxième scenario

❖ **La station de base avec une trajectoire aléatoire dans le champ**

On a adopté les protocoles LEACH (homogène et hétérogène) et SEP, on a simulé une station de base avec une trajectoire aléatoire dans le champ de captage. Les figures **(III.5) (III.6)** montrent l'environnement de la simulation :

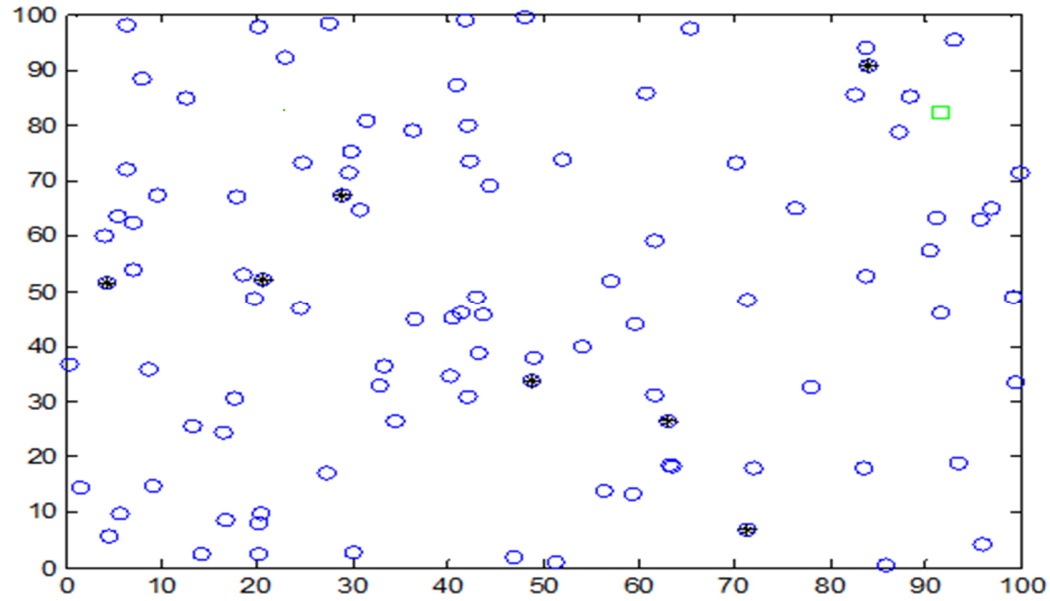


Figure. III.5 : *SB avec une trajectoire aléatoire dans un WSN homogène*

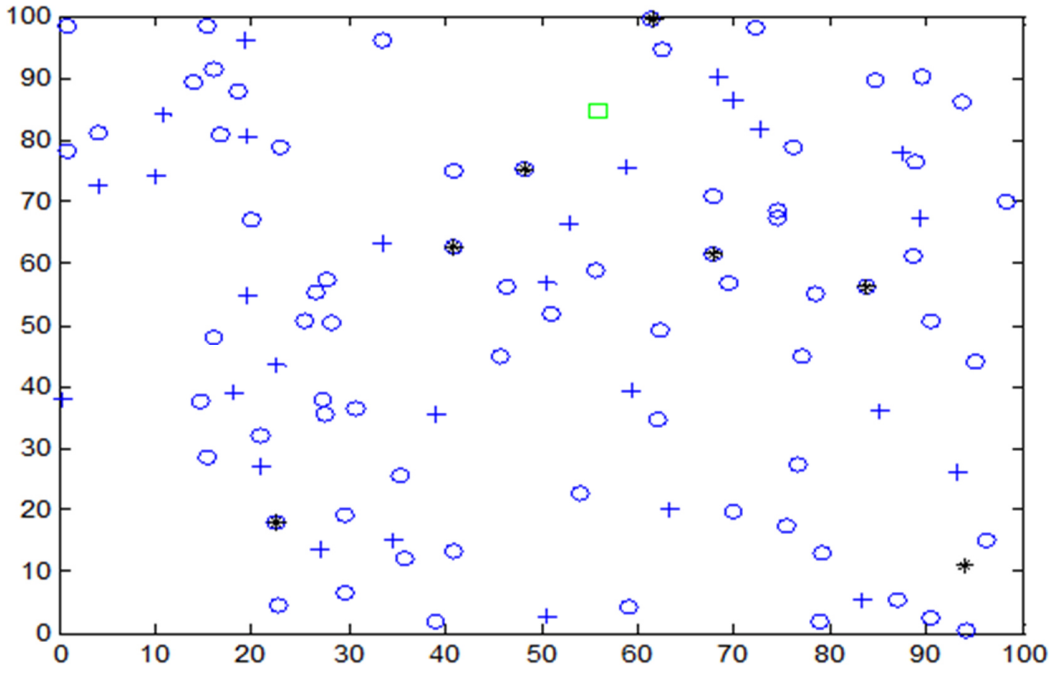


Figure. III.6 : *SB avec une trajectoire aléatoire dans un WSN hétérogène*

- **La stabilité**

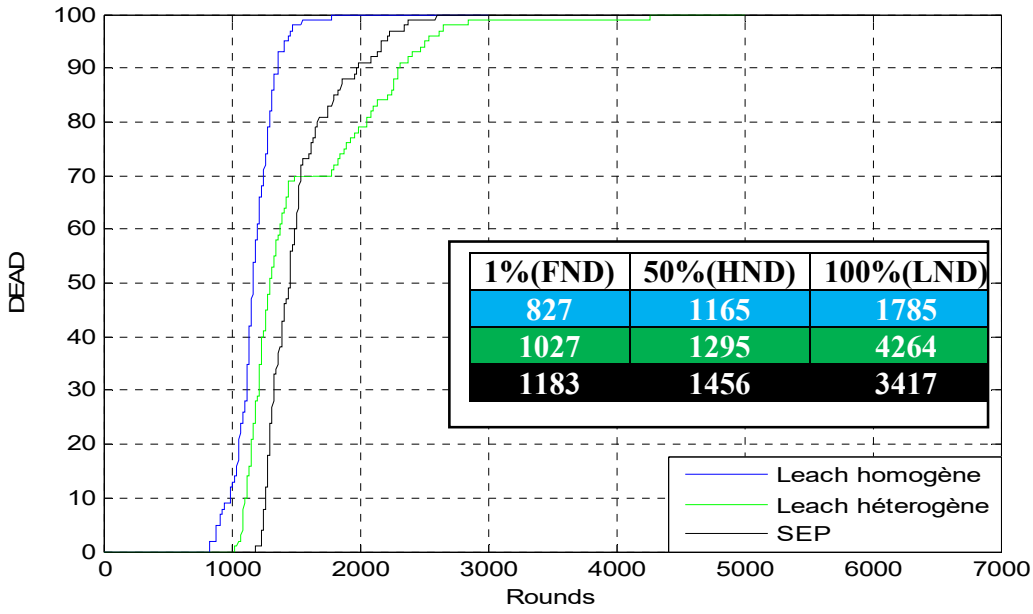


Figure. III.7: *stabilité dans WSN (homogène et hétérogène) avec une SB aléatoire dans le champ*

- **L'énergie consommée pendant la stabilité**

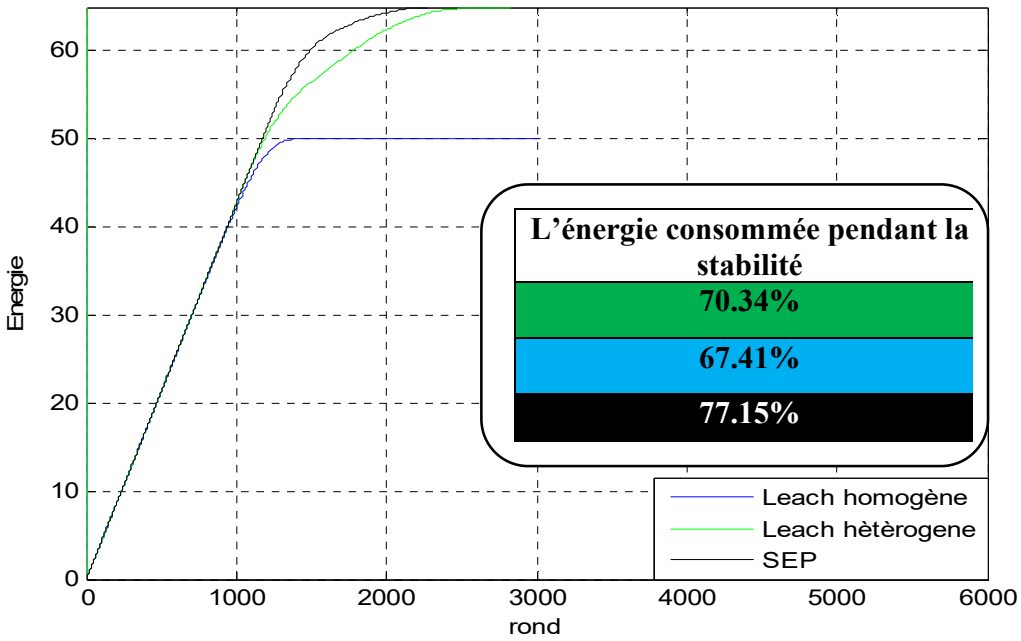


Figure. III.8: *énergie consommée pendant la stabilité par une SB aléatoire dans le champ avec les trois protocoles*

III.3.3 Résultats de simulation pour le troisième scenario

❖ **La station de base avec une trajectoire sur tout le périmètre du WSN**

On a adopté les protocoles LEACH (homogène et hétérogène) et SEP, on a simulé une station de base avec une trajectoire sur tout le périmètre du champ de captage. Les figures **(III.9) (III.10)** montrent l'environnement de la simulation :

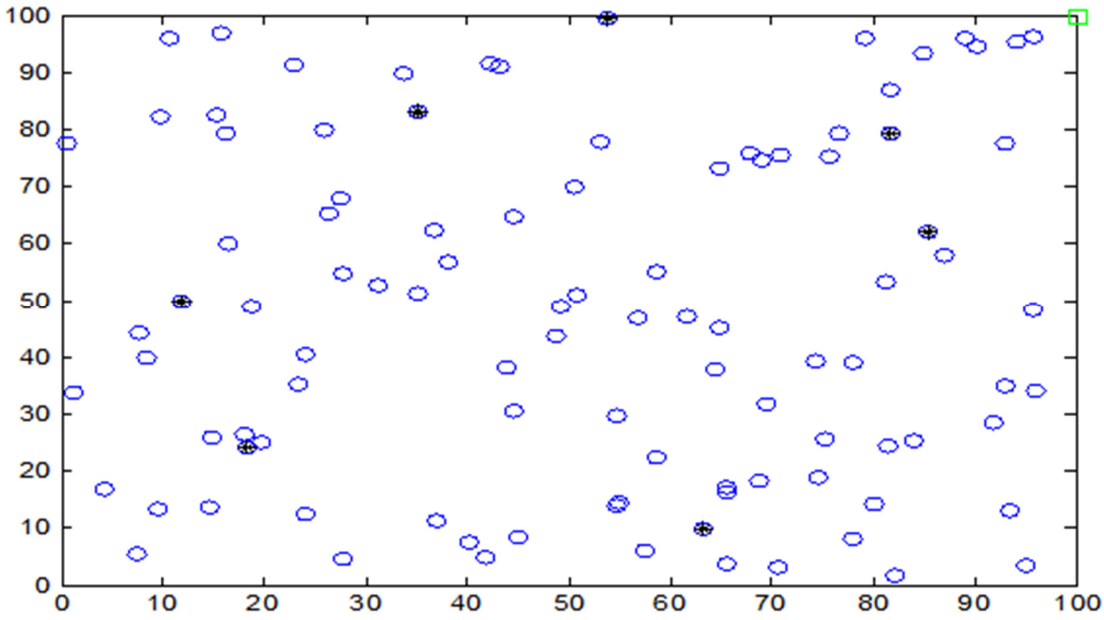


Figure. III.9 : *SB avec une trajectoire sur tout le périmètre d'un WSN homogène*

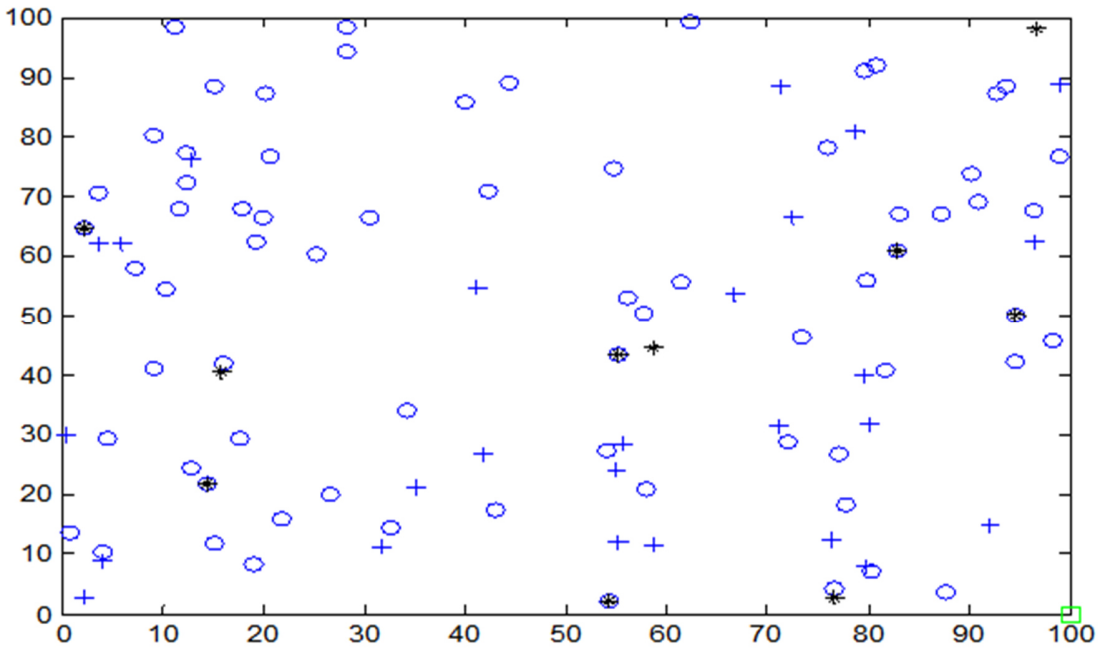


Figure. III.10 : *SB avec une trajectoire sur tout le périmètre d'un WSN hétérogène*

- **La stabilité**

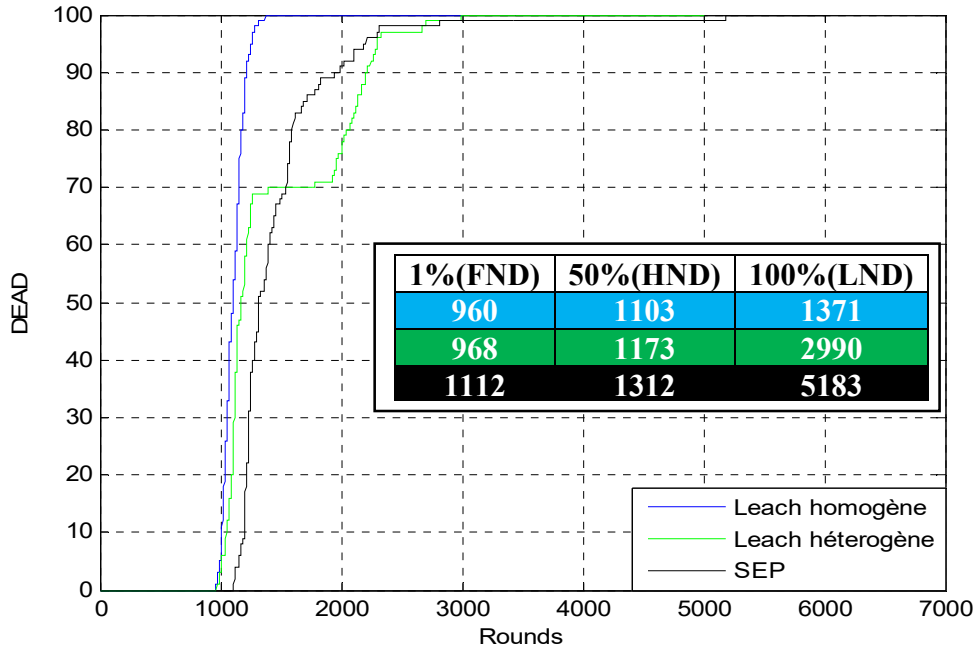


Figure. III.11: *stabilité dans WSN (homogène et hétérogène) avec une SB sur tout le périmètre de champ*

- **L'énergie consommé pendant la stabilité**

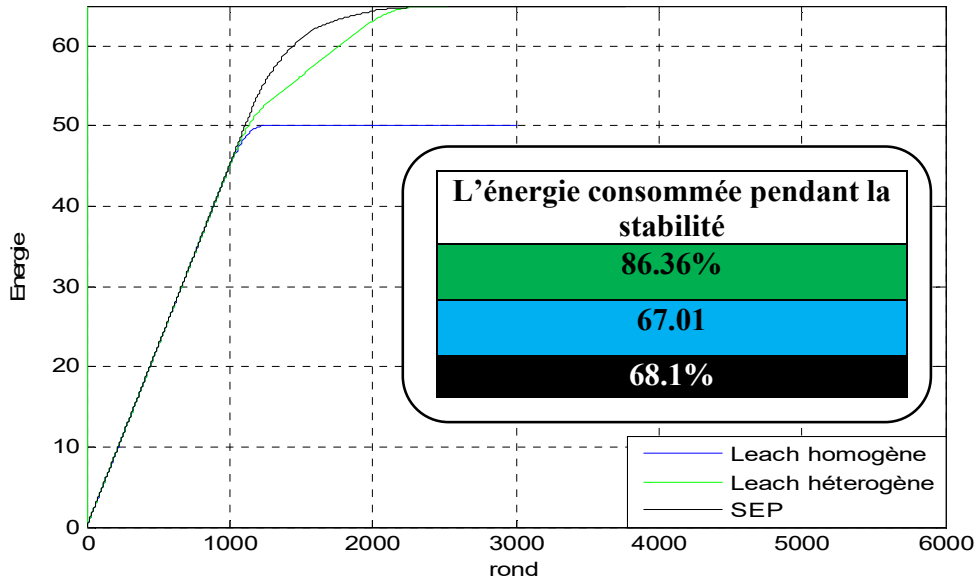


Figure. III.12: *énergie consommée pendant la stabilité par une SB sur tout le périmètre de champ avec les trois protocoles*

III.3.4 Résultats de simulation pour le quatrième scenario

❖ **La station de base avec une trajectoire en diagonal du WSN**

On a adopté les protocoles LEACH (homogène et hétérogène) et SEP, on a simulé une station de base avec une trajectoire en diagonal du champ de captage. Les figures **(III.13) (III.14)** montrent environnement de la simulation :

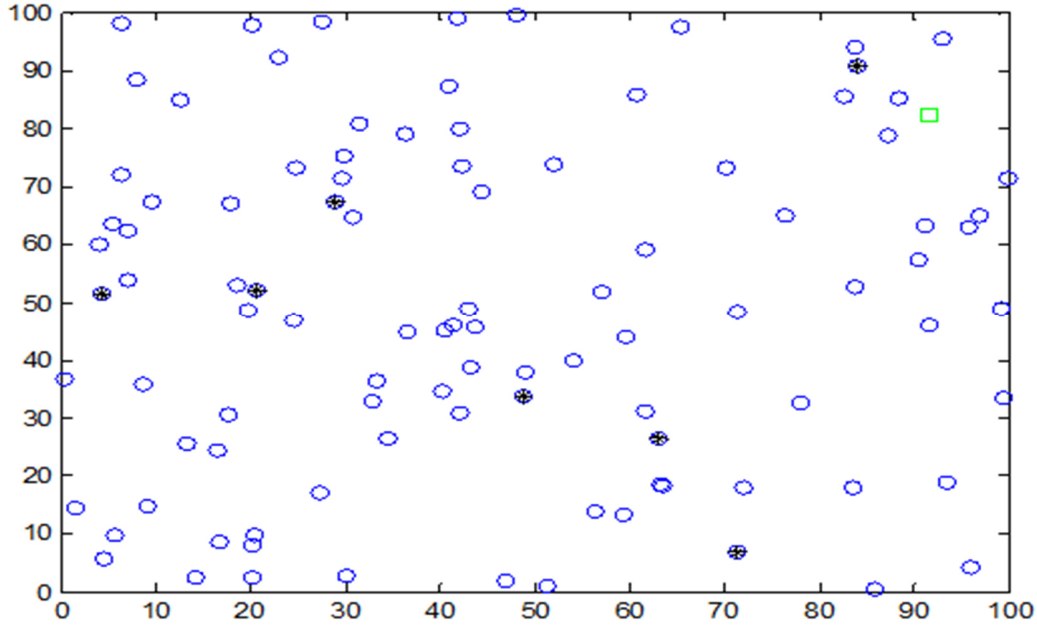


Figure. III.13 : *SB avec une trajectoire en diagonal d'un WSN homogène*

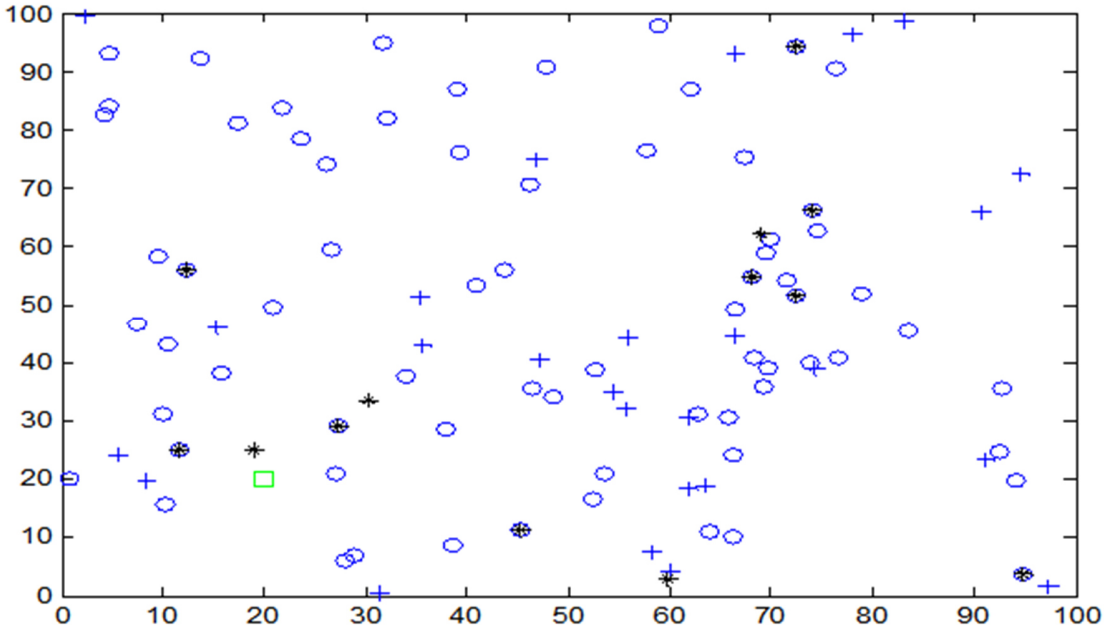


Figure. III.14 : *SB avec une trajectoire en diagonal d'un WSN hétérogène*

- **La stabilité**

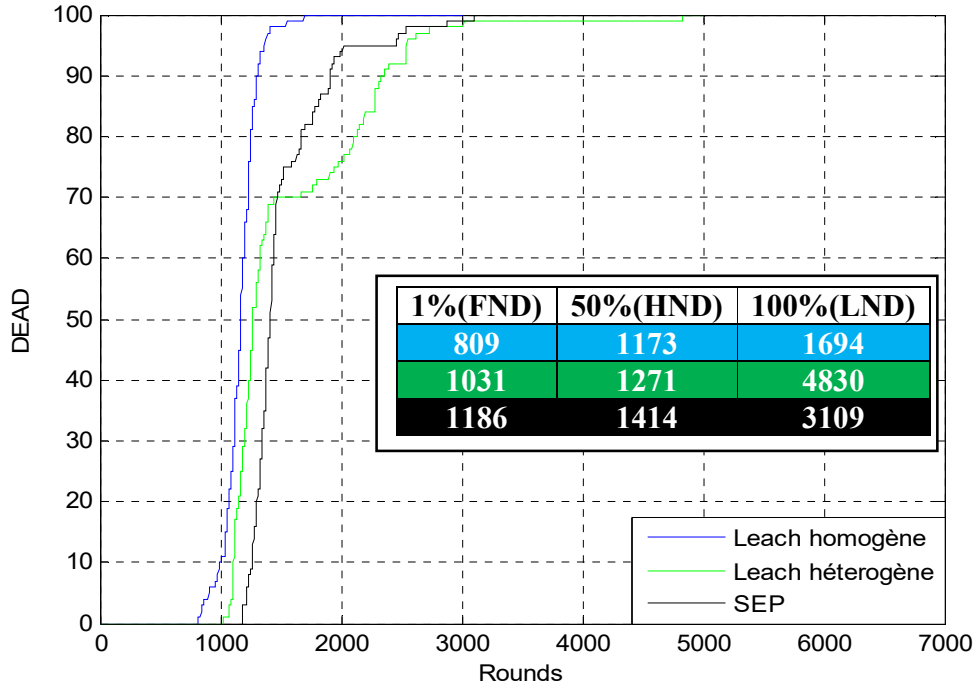


Figure. III.15: *stabilité dans WSN (homogène et hétérogène) avec une SB en diagonal de champ*

- **L'énergie consommée pendant la stabilité**

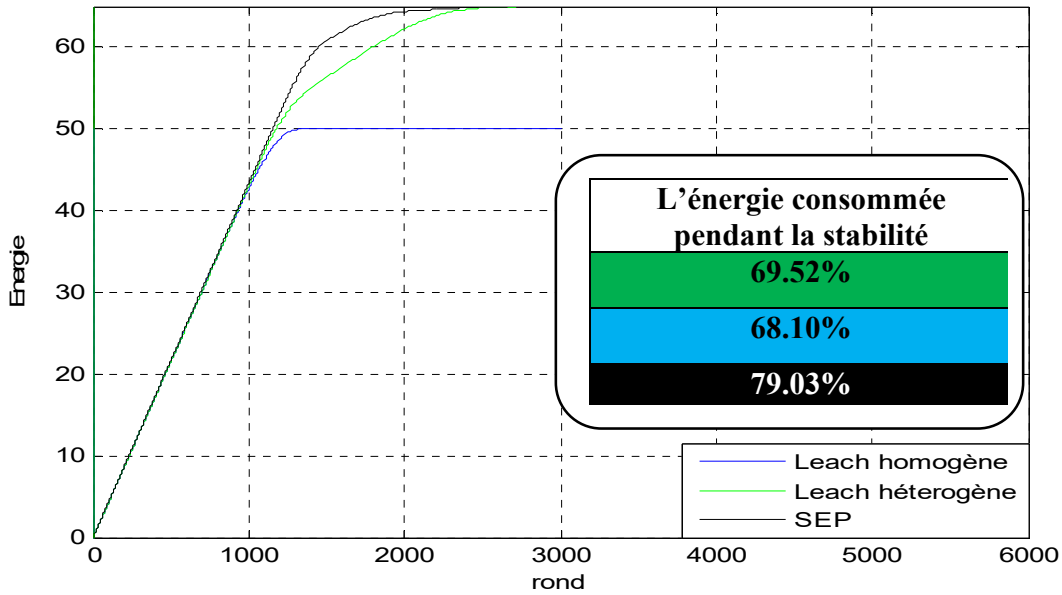


Figure. III.16: *énergie consommée pendant la stabilité par une SB en diagonal de champ avec les trois protocoles*

III.4. Analyse et interprétation des résultats

III.4.1. La stabilité

Les résultats de la stabilité des différentes trajectoires de la station de base dans le réseau sont résumés dans le tableau **(III.3)**

Tableau III.3 : *la stabilité du réseau avec différents emplacements de la SB par les trois protocoles*

LA STABILITE	LEACH HOMOGENE	LEACH HETEROGEN	SEP
SB FIXE AU CENTRE	756	1038	1202
SB ALEATOIRE	827	1027	1183
SB SUR LE PERIMETRE	960	968	1112
SB SUR LA DIAGONALE	809	1031	1186

Le tableau **(III.3)** est présenté selon l'histogramme (**III.17)**

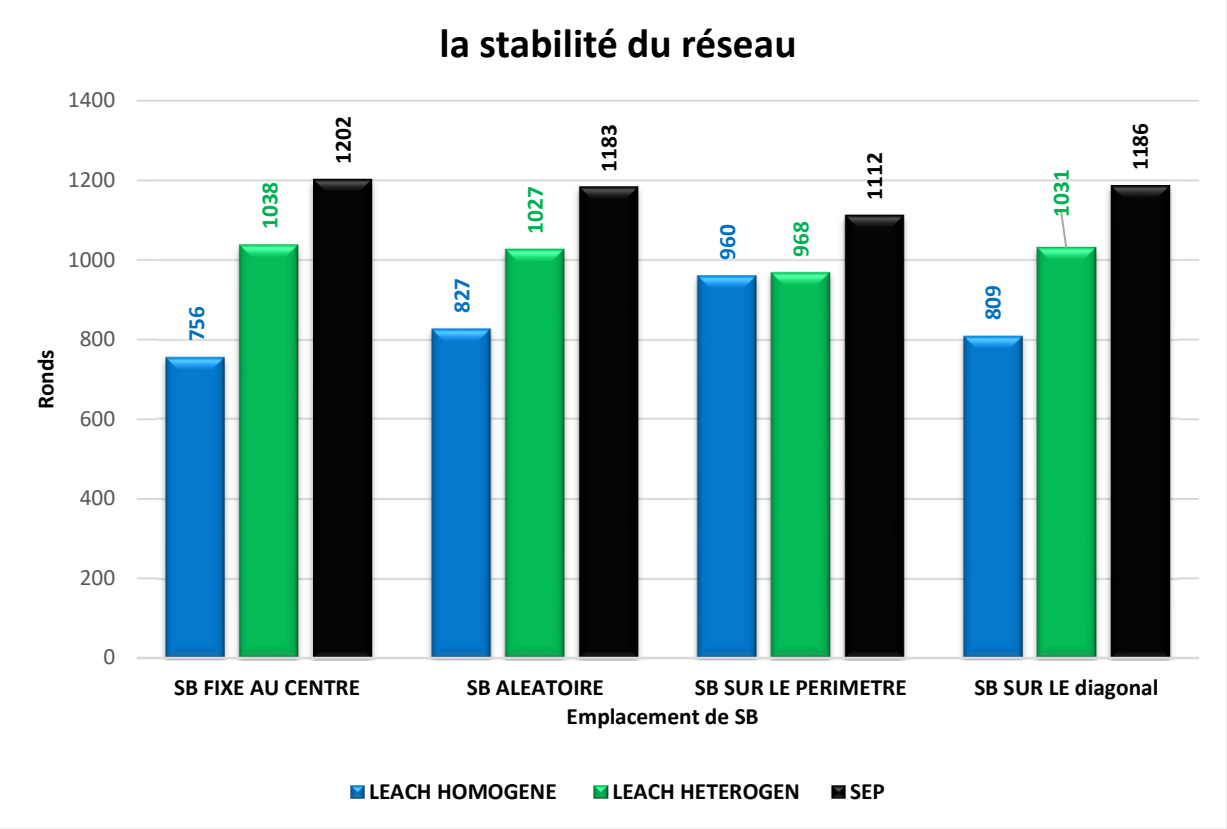


Figure. III.17: *histogramme de la stabilité des différents emplacements de la SB avec les trois protocoles*

Analyse des résultats :

- Dans le premier scenario (la SB fixée au centre) la stabilité avec le protocole LEACH homogène atteint **756 ronds**, tandis qu'avec le protocole LEACH hétérogène nous avons constaté une augmentation de **278 ronds.** Lors de l'utilisation du protocole SEP la stabilité a été amélioré par **446 ronds**.
- Dans le deuxième scénario (la SB avec une trajectoire aléatoire), on a enregistré une stabilité de **827 rond**s par LEACH homogène. LEACH hétérogène a augmenté la stabilité par **200 ronds**. Enfin SEP a marqué une amélioration par **356 ronds**.
- Dans le troisième scénario (la SB sur le périmètre du champ), on a eu la meilleure stabilité **960 ronds** en utilisant LEACH homogène, mais LEACH hétérogène et SEP n'ont pas enregistré une notable amélioration et était respectivement de **8ronds** et **52ronds**.
- Pour le quatrième scénario (la SB avec une trajectoire en diagonal), on a constaté avec LEACH homogène une stabilité de **809 ronds**, une augmentation avec **222 ronds** par LEACH hétérogène et une amélioration avec le protocole SEP de **377 ronds**.

Interprétation des résultats :

Les résultats ont montré que la stabilité du réseau peut être améliorée en utilisant des protocoles hétérogènes tels que LEACH hétérogène ou SEP, qui sont mieux adaptés pour gérer les ressources du réseau et les contraintes de la tâche à accomplir.

L'emplacement de la SB peut également affecter la qualité de la communication et la sélection des nœuds de cluster. Lorsque la SB est fixée au centre du réseau, la distance entre les nœuds et la SB est plus stable, ce qui engendre la plus forte amélioration de la stabilité globale du réseau

L'emplacement de la SB avec les trajectoires (aléatoires et en diagonal) ont apporté des améliorations similaires de la stabilité, car elles permettent une proximité avec la plupart des nœuds du réseau.

Cependant, la trajectoire de la SB sur tout le périmètre peut être moins optimale en raison de la plus grande distance entre la SB et les nœuds, ce qui peut affecter la sélection des nœuds de cluster et la qualité de la communication.

Il convient de noter que les résultats peuvent varier en fonction des caractéristiques spécifiques du réseau telles que la densité des nœuds, la portée des signaux, les contraintes de la tâche à

accomplir et la durée de vie des batteries des nœuds. Il est donc important de prendre en compte ces facteurs lors de la conception et de l'implémentation des protocoles de communication pour optimiser la stabilité du réseau.

III.4.2. L'énergie consommée pendant la stabilité

Le tableau (**III.4**) montre les résultats de l'énergie consommée pendant la période de stabilité pour les différentes trajectoires avec les trois protocoles :

Tableau III.4 : l'énergie *consommée pendant la stabilité des différents emplacements de la SB avec les trois protocoles*

Energie consommée pendant la stabilité	LEACH HOMOGENE	LEACH HETEROGEN	SEP
SB FIXE AU CENTRE	63,56%	67,20%	77,18%
SB ALEATOIRE	70,38%	67,41%	77,15%
SB AU LONG DU PERIMETRE	86,36%	67,01%	77,15%
SB SUR LE diagonal	69,52%	68,10%	79,03%

Le tableau **(III.4)** est présenté selon l'histogramme (**III.18**)

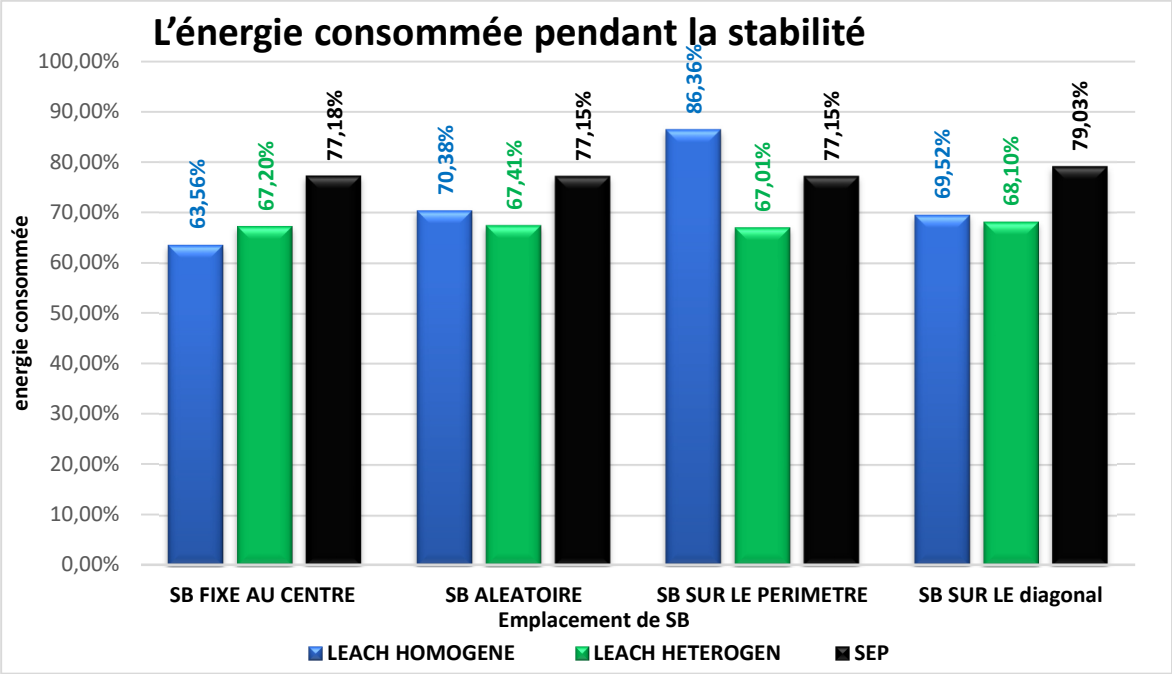


Figure. III.18: *l'énergie consommée pendant la stabilité dans différents emplacements de la SB par les trois protocoles*

Analyse des résultats :

- Dans le cas où la SB est fixée au centre, l'énergie consommée pendant la stabilité par le protocole LEACH homogène était **63,56%**, tandis qu'avec le protocole LEACH hétérogène elle était de **67,20%.** Lors de l'utilisation du protocole SEP la consommation d'énergie atteint **77,18%.**
- Dans le deuxième cas ou la SB avait une trajectoire aléatoire, on a enregistré une consommation d'énergie de **70.38%** par LEACH homogène. Avec LEACH hétérogène l'énergie consommée était réduite à **67.41%,** alors qu'avec SEP on a enregistré la meilleure consommation d'énergie **77.15%**.
- Dans le cas où la SB est sur le périmètre du champ, on a eu la plus haute consommation d'énergie en utilisant LEACH homogène à **86.36%**, mais on a enregistré une dégradation de consommation d'énergie avec LEACH hétérogène à **67.01%** et avec SEP à **77.15%**.
- Dans le cas où la SB avait une trajectoire en diagonal, on a constaté qu'avec LEACH homogène l'énergie consommée est de **69.52%**, une réduction négligeable de consommation de **69.10%** par LEACH hétérogène et une augmentation de consommation avec le protocole SEP **79.03%**.

Interprétation des résultats :

Dans le cas où la SB est fixée au centre du réseau, on a constaté une augmentation de la consommation d'énergie avec les protocoles LEACH hétérogène et SEP avec une amélioration notable de la stabilité. Cela est dû à la sélection efficace des chefs de cluster et à l'optimisation de la couverture du réseau, ce qui peut conduire à une réduction de la perte de paquets.

En revanche, lorsque la SB était aléatoire dans le réseau, on a observé une réduction de la consommation d'énergie avec le protocole LEACH hétérogène, mais une augmentation avec le protocole SEP. Cependant, les deux protocoles ont montré une amélioration acceptable de la stabilité, ce qui est attribué à la création efficace de clusters.

Lorsque la SB était sur le périmètre du champ, on a constaté une réduction de la consommation d'énergie avec les protocoles LEACH hétérogène et SEP, sans amélioration notable de la stabilité. Cela est dû à la portée des signaux qui affecte la connectivité du réseau et la qualité de transmission des données.

Enfin, pour la SB sur le diagonal du champ, on a observé une réduction de la consommation d'énergie avec le protocole LEACH hétérogène et une augmentation avec le protocole SEP. L'amélioration de la stabilité est acceptable, ce qui peut être attribué à la sélection efficace des chefs de cluster.

III.4.3. Durée de vie

Le tableau **(III.5)** montre la durée de vie des nœuds capteur dans WSN avec les trois protocoles dans les différentes trajectoires :

Tableau III.5 : *la durée de vie des nœuds capteur dans WSN des différents emplacements de la SB avec les trois protocoles*

Durée de vie	LEACH HOMOGENE	LEACH HETEROGEN	SEP
SB FIXE AU CENTRE	**2157**	3301	3417
SB ALEATOIRE	1785	4264	**2597**
SB SUR LE PERIMETRE	**1371**	**2990**	**5183**
SB SUR LE DIAGONAL	1694	**4830**	3109

L'histogramme **(III.19)** est une représentation du tableau **(III.5)**

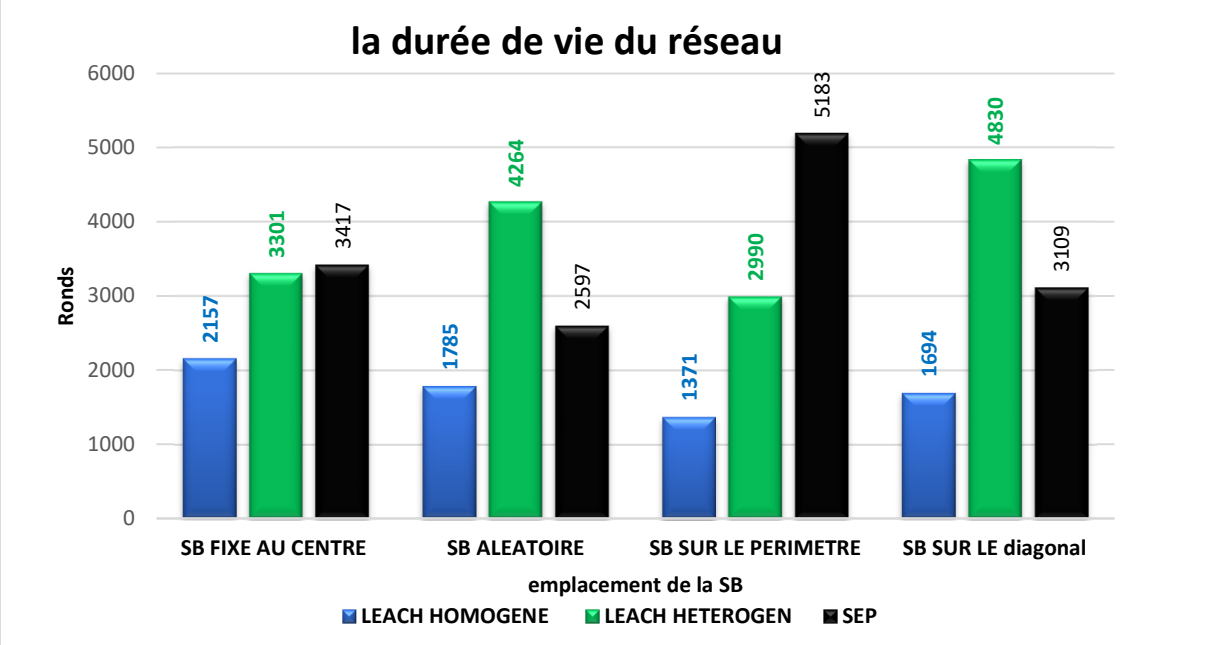


Figure. III.19 : *histogramme de la durée de vie des nœuds capteur dans WSN des différents emplacements de la SB avec les trois protocoles*

Analyse des résultats :

- Dans le cas où la SB était fixée au centre la durée de vie des nœuds avec le protocole LEACH homogène atteint **2157 ronds** tandis qu'avec les deux autres protocoles on a constaté presque la même augmentation, LEACH hétérogène est de **3301 ronds** et avec SEP **3417 ronds.**
- Pour le deuxième cas ou la SB avait une trajectoire aléatoire, on a enregistré une durée de vie de **1785 ronds** par LEACH homogène. Avec LEACH hétérogène on a marqué une augmentation plus de double **4264 ronds**. Enfin SEP a marqué une réduction de durée de vie égale à **2597 ronds**.
- Pour le troisième cas ou la SB était sur tout le périmètre du champ, on a eu la petite durée de vie **1371 ronds** en utilisant LEACH homogène, on a enregistré une amélioration avec LEACH hétérogène **2990 ronds** et une meilleure augmentation avec SEP **5183 ronds**.
- Dans le cas où la SB avait une trajectoire en diagonal, on a constaté avec LEACH homogène une durée de vie de **1694 ronds**, une augmentation presque en triple **4830 ronds** par LEACH hétérogène et une très bonne augmentation avec SEP **3109 ronds**.

Interprétation des résultats :

Pour le premier cas où la SB est au centre du réseau, l'augmentation de la durée de vie des nœuds capteurs avec les deux protocoles peut s'expliquer par la réduction de la distance entre les nœuds et la SB, ce qui réduit la consommation d'énergie pour la transmission de données et permet une meilleure utilisation de l'énergie.

Dans le deuxième cas, où la trajectoire de la SB était aléatoire dans le réseau, on a observé une augmentation presque en double de la durée de vie des nœuds capteurs avec le protocole LEACH hétérogène, car il permet une meilleure répartition de la charge énergétique entre les nœuds, tandis que l'augmentation moins importante avec le protocole SEP peut être due à la perte de certains paquets de données lors de la transmission.

Pour le troisième cas où la SB était sur le périmètre du champ, on n'a pas marqué de grandes augmentations de durée de vie des nœuds avec le protocole LEACH hétérogène Cela peut être dû à la densité des nœuds le long du périmètre, mais l'augmentation la plus élevé c'est avec SEP Cela peut-être en ajustant plus efficacement l'utilisation des ressources énergétiques des nœuds.

Pour le quatrième cas où la SB était en diagonal du champ, on a observé une augmentation significative de la durée de vie des nœuds capteurs, presque le triple avec le protocole LEACH hétérogène et presque en double en utilisant le protocole SEP, car la position de la SB permet une couverture plus optimale du champ avec moins de nœuds et donc une réduction de la consommation d'énergie.

III.5. Conclusion

Nous avons mené une étude comparative sur l'impact de l'emplacement de la station de base dans un WSN (Wireless Sensor Network). On a impliqué quatre trajectoires différentes pour la station de base (fixe, aléatoire, sur le périmètre et sur la diagonale du champ) avec l'utilisation de trois protocoles de routage (LEACH homogène, LEACH hétérogène, SEP) pour chaque scénario.

Cette étude a été menée à l'aide d'une simulation MATLAB qui nous a permis de comparer les différentes trajectoires de la station de base avec les trois protocoles.

Après avoir comparé les résultats de la simulation, on a remarqué des améliorations en termes de stabilité, de consommation d'énergie et de durée de vie lorsque nous avons utilisé les protocoles LEACH hétérogène et SEP avec tous les emplacements de la station de base.

La meilleure amélioration a été observée lorsque la station de base était fixée au centre du réseau, suivie par une trajectoire aléatoire et en diagonal de la station de base, et enfin par une trajectoire le long du périmètre du champ.

Conclusion générale

Dans les années à venir, les réseaux de capteurs sans fil (WSN) devraient constituer un développement technologique majeur offrant des solutions dans de nombreux domaines tels que la sécurité, la santé, l'agronomie, etc. L'un des objectifs clés de la conception des protocoles de routage dans les WSN est d'optimiser l'utilisation de l'énergie afin de prolonger leur durée de vie. Parmi les protocoles les plus efficaces et populaires se trouvent les protocoles de routage hiérarchiques basés sur le clustering, tels que LEACH homogène, LEACH hétérogène et SEP.

Pour évaluer les performances des protocoles de routage et leur impact sur la durée de vie du réseau, nous avons réalisé une simulation en utilisant le simulateur MATLAB. Nous avons comparé les résultats des trois protocoles en tenant compte de différentes trajectoires de la station de base. Les trajectoires étudiées comprennent la fixation de la station de base au centre du réseau, une trajectoire aléatoire, une trajectoire sur le périmètre du champ et une trajectoire diagonale du champ.

Les résultats de la simulation ont montré que le protocole SEP offre une meilleure gestion de l'énergie par rapport aux protocoles LEACH homogène et LEACH hétérogène. En ce qui concerne les différentes trajectoires de la station de base, l'ordre de préférence en termes de performances du réseau était le suivant : la station de base fixée au centre du réseau est la plus efficace, suivie du scénario de la trajectoire aléatoire, puis de la trajectoire dans la diagonale du champ, et enfin de la trajectoire sur le périmètre du champ.

L'utilisation des protocoles de routage hiérarchiques tels que LEACH homogène, LEACH hétérogène et SEP dans les réseaux de capteurs sans fil offre des opportunités pour prolonger leur durée de vie et optimiser la gestion de l'énergie. Les résultats de la simulation ont démontré que le protocole SEP et la fixation de la station de base au centre du réseau sont les options les plus efficaces pour atteindre ces objectifs. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour le déploiement et la gestion des WSN dans différents domaines d'application.

Perspectives

Face à l'importance croissante des réseaux de capteurs sans fil dans divers domaines, il devient primordial de trouver des solutions pour prolonger leur durée de vie. En effet, une durée de vie prolongée permettrait d'optimiser l'utilisation de ces réseaux et d'assurer leur fonctionnement efficace sur le long terme.

Parmi les solutions proposées, l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) se présente comme une avenue prometteuse pour améliorer la gestion de l'énergie, l'efficacité des protocoles de routage et la planification de la maintenance des capteurs. Une autre approche consiste à utiliser des techniques de Harvesting d'énergie pour alimenter les capteurs. Cela implique de récupérer l'énergie à partir de sources telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou les variations thermiques, et de la convertir en énergie utilisable pour alimenter les capteurs

Les algorithmes d'économie d'énergie sont utilisés pour optimiser l'utilisation de l'énergie dans un WSN. Ils comprennent des stratégies telles que l'ajustement dynamique de la fréquence de transmission, la gestion de la puissance de transmission et l'optimisation de l'allocation des ressources pour minimiser la consommation d'énergie

L'utilisation des drones dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN) offre des possibilités innovantes pour prolonger la durée de vie et améliorer l'efficacité de ces réseaux. Les drones peuvent recharger les capteurs énergétiquement épuisés, remplacer rapidement les capteurs défaillants et faciliter le déploiement et la reconfiguration des capteurs. De plus, les drones peuvent collecter des données à grande échelle et compléter les informations fournies par les capteurs fixes du WSN. En combinant les capacités des drones avec les WSN, il est possible d'optimiser la gestion de l'énergie, la maintenance et la collecte de données, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie des réseaux et à améliorer leur utilisation dans différents domaines d'application.

Références bibliographiques

[1]. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam et E. Cayirci, «Wireless sensor networks: a survey, » Computer Networks, vol: 38, no: 4, p: 393-422. 2002.

[2] Wang, Y., Attebury, G., & Ramamurthy, B. «A survey of security issues in wireless sensor networks». IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol: 8, no: 2, p: 2-23. 2006.

[3] S. S. Islam, M. S. Hossain, et K. A. Hossain, «Wireless Sensor Network Architecture for Structural Health Monitoring»: A Review," in 2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), Cox's Bazar, Bangladesh, p: 1-6. 2019.

[4] H. Kim, S. Park, S. Lee, et S. Lee, « Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey, » International Journal of Distributed Sensor Networks, vol: 9, no: 8. 2013.

[5] J.N Al-Karaki et A. E. Kamal, « Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey», Magazine: IEEE Communications, vol: 11, no: 6, p: 6-28. December 2004.

[6] A. K. Sahoo, R. Prasad et S. K. Setua, «Wireless Sensor Network: An Overview, » International Journal of Computer Science Issues, vo: 7, no: 3, p: 59-68. mai 2010.

[7] M. Ilyas et I. Mahgoub, « Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems», CRC Press, 2004.

[8] C. Zhang, Y. Liu, J. Chen, L. Wang et X. Cao, «An Overview of Wireless Sensor Network» Journal of Communications, vol:10, no: 9, p: 751-762. 2015.

[9] F. Chen, J. Wu, J. Xia et Y. Qian, «Data aggregation in wireless sensor networks: A survey » , International Journal of Distributed Sensor Networks, vol: 9, no: 8. 2013.

[10] J. Mao, K. Fawaz, et A. El-Saddik, « A survey on network solutions for wireless sensor networks in military applications » ,IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol: 17, no: 2, p: 794-815.

[11] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. « Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications». IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol:17, no:4, p: 2347-2376. 2015.

[12] Sadaf, S., & Javaid, N. «Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. Wireless Networks», vol:25, no: 6, p: 3383-3408. 2019.

[13] Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R., & Anderson, J. «Wireless sensor networks for habitat monitoring. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications» p: 88-97. 2002.

[14] Raza, U., Kulkarni, P., Sooriyabandara, M., & Sheng, Z. «Wireless sensor networks for building automation: A review and case study». Journal of Network and Computer Applications, 80, 1-25. 2017.

[15] Wang, S., Guo, S., & Peng, Y. «Wireless sensor network-based structural health monitoring: A comprehensive review». Journal of Sensors, 2018.

[16] Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R., & Anderson, J. «Wireless sensor networks for habitat monitoring». In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, p:88-97. 2002.

[17] D. Niculescu, «Topics in Ad-Hoc Networks: Communication Paradigms for Sensor Networks», NEC Laboratories America, IEEE Communications Magazine, Mars 2005.

[18] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. Teen, «a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks», In Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2001.

[19] D. Bhattacharyya, T. Kim, and S. Pal, «A comparative study of wireless sensor networks and their routing protocols», Sensors 2010, 10, pages: 10506-10523; Novembre 2010.

[20] J.N Al-Karaki and A. E. Kamal, «Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey», Magazine: IEEE Communications, vol: 11, no: 6, p: 6-28, December 2004.

[21] Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. «An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks». IEEE Transactions on wireless communications, vol : 1 no :4, p : 660-670. 2002.

[22] M. Amina, « Etude comparative entre les deux protocoles de routage LEACH et PEGASIS dans les réseaux de capteurs sans fil » Mémoire de Master, Département de télécommunication, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Mai 2015.

[23] A. Aderohunmu, «Energy Management Techniques in Wireless Sensor Networks: Protocol Design and Evaluation», thèse, université de Otago Library, Dunedin, New Zealand, 2010.

[24] M. Amina, « *Etude comparative entre les deux protocoles de routage LEACH et PEGASIS dans les réseaux de capteurs sans fil*» Mémoire de Master, Département de télécommunication, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Mai 2015.

[25] MATLAB Function Reference

[26] “MATLAB - Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB (accessed Sep. 14, 2020).