

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderahmane Mira Béjaïa  
Faculté des Sciences Exactes  
Département d'Informatique



## MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue d'obtention du diplôme de Master Recherche en Informatique

Filière : Informatique

Option : Système d'information avancés

**Présenté par**

Baghdadi Tayma

Zebiri Mounir

Thème

---

# Routage avec QoS dans les RCSF : Approche par la théorie des jeux .

---

Soutenu le 14/9/2023 devant le jury

Houha Amel	MAA	Université de Bejaïa	Présidente
Sabri Salima	MCB	Université de Bejaïa	Examinatrice
Bouadem Nassima	MCB	Université de Bejaïa	Encadrante
Bouibed Karima	MCB	Université de Bejaïa	Co-encadrante

Année Universitaire 2022-2023

# *Remerciements*

*Nous remercions tout d'abord Allah, le tout puissant de nous avoir illuminé et ouvert les portes de savoir et nous avoir donné la volonté et le courage d'élaborer ce travail.*

*Nous tenons aussi à remercier et à exprimer notre profonde gratitude à nos encadrantes Madame Bouadem Nassima et Madame Bouibed Karima pour nous avoir orienté durant l'élaboration de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier l'ensemble de membres de jury qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail.*

*Nous présentons aussi nos remerciements à l'ensemble des enseignants du département d'Informatique*

*Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin durant l'élaboration de notre mémoire de fin d'étude.*

*Nos remerciements les plus vifs vont tout particulièrement à nos parents.*

# Table des matières

Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	viii
<b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction	1
1.2 Les types des réseaux sans fil	2
1.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fils	4
1.4 Paramètres influençant la conception d'un RCSF	6
1.5 La qualité de service dans les réseaux de capteurs sans fil	7
1.5.1 Aperçu sur la qualité de service (QoS) :	7
1.5.2 Métriques de QoS :	8
1.6 Le routage dans Les réseaux de capteurs sans fils	8
1.6.1 Définition du routage :	8
1.6.2 Facteurs influençant la conception d'un protocole de routage	9
1.6.3 Classification des protocoles de routage pour les RCSFs	10
1.7 Conclusion	14
<b>2 Généralités sur la théorie des jeux</b>	<b>15</b>
2.1 Introduction	15
2.2 Notions de base de la théorie des jeux	16
2.3 Les différents types de jeu :	16
2.3.1 Jeux coopératifs ou non coopératifs :	17
2.3.2 Jeu à information parfaite ou imparfaite :	17
2.3.3 Jeu à somme nulle :	17
2.3.4 Jeu simultans et jeu séquentiel :	17
2.3.5 Jeux sous forme normale ou sous forme extensive :	17
2.4 Concepts de solution	19
2.4.1 Equilibre en stratégies dominantes	20
2.4.2 Équilibre de Nash	20
2.5 Quelques champs d'applications de la théorie des jeux dans le domaine informatique	21
2.6 Conclusion	22

<b>3</b>	<b><i>Application de la théorie des jeux dans les réseaux de capteurs sans fils</i></b>	<b>23</b>
3.1	Introduction . . . . .	23
3.2	Etat de l'art . . . . .	23
3.2.1	Principes du clustering . . . . .	23
3.2.2	Topologie en clusters . . . . .	24
3.2.3	Approches de clustering . . . . .	27
3.2.4	les Algorithmes de clustering basé sur la théorie des jeux pour les réseaux de capteurs sans fil : . . . . .	32
3.3	Notre proposition :LEACH basé sur la théorie de jeux . . . . .	33
3.3.1	Les étapes du protocole proposé . . . . .	33
3.3.2	Le diagramme qui représente les étapes de protocole modifié avec notre proposition basé sur la théorie de jeux . . . . .	36
3.3.3	L'algorithme proposé pour la sélection des clusters-heads . . . . .	37
3.3.4	Le modèle d'énergie utilisé dans notre approche . . . . .	39
3.3.5	Comparaison enter notre l'algorithme basé sur la théorie de jeux et le protocole LEACH . . . . .	42
3.4	L'énergie restera-t-elle une problématique pour les RCSF : . . . . .	42
3.4.1	Conclusion . . . . .	43
<b>4</b>	<b><i>Implémentation et évaluation de protocole proposé</i></b>	<b>44</b>
4.1	Introduction . . . . .	44
4.2	Les simulateure de réseaux de capture sans fil . . . . .	45
4.3	Les paramètre de réseaux . . . . .	46
4.4	Méthodologie de Simulation . . . . .	46
4.5	Résultats de la Simulation . . . . .	47
4.6	Analyse des Résultats . . . . .	48
4.7	Conclusion . . . . .	48
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	<b>50</b>

# *Table des figures*

1.1	Architecture d'un réseau sans-fil Ad hoc [1]	2
1.2	Réseaux de Capteur Sans Fil RCSF [2]	3
1.3	Exemple de capteur sans fil [3]	3
1.4	Architecture d'un nœud-capteur[4]	4
1.5	Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fils [5]	6
1.6	Graphe représentatif du routage,dans un réseau de 7 nouds	9
1.7	Algorithmes de routage basés sur des mécanismes de clustering	11
2.1	Dilemme du prisonnier	18
2.2	Le présentation d'un jeu par un arbre	19
2.3	Jeu séquentiel	19
3.1	Etapes d'organisation d'une topologie en clusters	24
3.2	Exemple de topologie basée sur des clusters	25
3.3	Catégorisation suivant le processus d'élection des cluster-heads	28
3.4	Communication en cluster pour LEACH	29
3.5	Répartition du temps et différentes phases pour chaque round	36
3.6	Le diagramme qui représente les étapes de protocole modifier avec notre proposition	37
3.7	Consommation d'énergie en acquisition, traitement et communication	40
3.8	Répartition du temps et différentes phases pour chaque round	41
3.9	Comparaison enter LEACH proposé et LEACH	42
4.1		45
4.2		45
4.3		46
4.4		46
4.5	Courbe représente le nombre de période pendant lesquelles chaque protocole a maintenu le réseaux actif a chaque exécution.	47

# *Liste des tableaux*

1.1	LEACH et ses descendants . . . . .	13
1.2	Comparaison entre les protocoles de routage basés sur le clustering . . . . .	14
3.1	Comparaison entre l'algorithme basé sur la théorie de jeux et le protocole LEACH . . . . .	42
4.1	Les paramètres de réseaux . . . . .	47
4.2	Résultats de la Simulation . . . . .	48

# *Liste des abréviations*

**RCSF** : réseaux de capteurs sans fil.

**QoS** : Qualité de Service.

**RREQ** : Routing REQuest.

**EAP** :Energy Aware Routing Protocol .

**MCR** : Multihop Communication Routing.

**LCA** :Linked Cluster Algorithm.

**WCA** :Weight Clustering Algorithm.

**LBC** :Load Balanced Clustering.

**GLBCA** : Greedy Load Balanced Clustering Algorithm.

**CBRP** :Cluster-Based Routing Protocol.

**DSR** : Dynamic Source Routing.

**LEACH** :Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

**GPS** : Global Positioning System .

**GEAR** :Geographique and Energy Aware Routing.

**SPIN** : Sensor Protocol for Information Negotiation.

**SAR** : Sequential Assignment Routing.

**DSN** : Distributed sensor networks.

**CCITT** : Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique.

**CCS** : Concentric Clustering Scheme.

**PEGASIS** : Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems.

**AODV** : Ad-hoc On-demand Distance Vector.

**AOMDV** : Ad-hoc On demand Multi-path Distance Vector.

**HEED** : Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering.

**EECS** : Energy Efficient Clustering Scheme.

**TPC** : contrôle de la puissance de transmission.

**MAC** : Media access control.

**CHs** : chef de cluster.

**TDMA** : Time division multiple.

**WSN** : Wireless Sensor Network.



# *Introduction générale*

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

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) sont une composante essentielle des systèmes de communication modernes, apportant des solutions innovantes à une vaste gamme d'applications dans divers domaines, de la surveillance environnementale à la santé, de la gestion des infrastructures critiques à l'industrie, en passant par la domotique. L'efficacité de ces RCSF repose en grande partie sur la manière dont les données sont acheminées des nœuds capteurs vers la station de base ou le point central de collecte. Le routage dans les RCSF est donc un élément clé de leur fonctionnement et de leur performance globale. L'un des défis majeurs dans le domaine des RCSF est la gestion efficace de l'énergie limitée dont disposent les nœuds capteurs, généralement alimentés par des batteries. Prolonger la durée de vie opérationnelle de ces réseaux tout en garantissant des performances de communication adéquates est un enjeu crucial. Le protocole LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est l'un des protocoles de routage les plus largement utilisés dans les RCSF, conçu pour économiser de l'énergie en organisant les nœuds en clusters et en activant périodiquement des "cluster-heads" (nœuds chefs de cluster) pour gérer la communication. Cependant, LEACH et ses variantes traditionnelles ne tiennent pas toujours compte de la Qualité de Service (QoS) requise par différentes applications déployées dans les RCSF. De plus, ils ne considèrent pas les interactions stratégiques entre les nœuds capteurs, ce qui peut entraîner une utilisation inefficace de l'énergie. C'est dans ce contexte qu'intervient l'approche basée sur la théorie des jeux. La théorie des jeux fournit un cadre mathématique puissant pour modéliser et analyser les interactions stratégiques entre les nœuds capteurs dans les RCSF. Cette recherche vise à proposer une amélioration significative du protocole LEACH en utilisant une approche de la théorie des jeux, intégrant la QoS comme un critère fondamental tout en optimisant la conservation d'énergie. On se pose alors les trois questions suivantes :

1. Comment modéliser le problème de routage dans les RCSFs par la théorie des jeux, tout en considérant le critère d'énergie à minimiser ?
2. Quel est le concept de solution approprié ?
3. Quelles sont les étapes de résolution de ce jeu ?

À fin d'apporter des réponses à ces questions, on a procédé comme suit :

Le premier chapitre présente les réseaux sans fils en général et les réseaux de capteurs en particulier, leurs architectures, leurs différents domaines d'applications et nous traitons le routage dans les réseaux de capteurs sans-fil, ainsi que sur les différents protocoles de routage utilisés ,et nous faisons le point sur la qualité de service dans les RCSFs ,Nous détaillons aussi les mécanismes proposés pour la minimisation de la consommation d'énergie et pour la prolongation de la durée de vie du réseau.

Dans le deuxième chapitre, nous donnons un aperçu général sur les notions de base de la théorie des jeux ‘a savoir les éléments essentiels d’un jeu, Les différents types de jeu ainsi que quelques concepts de solutions des jeux. Nous terminons par quelques champs d’applications de la théorie des jeux dans le domaine informatique.

Dans le troisième chapitre nous présentons une étude des algorithmes de clustering et nous détaillons également quelques techniques de clusterisation de la littérature ainsi que leurs apports énergétiques et après nous proposons une solution basé sur la théorie de jeux pour économiser l’énergie dépensée et maximiser la durée de vie du réseau .

# Chapitre 1

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

### 1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent une nouvelle génération de réseaux qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs. Ils sont formés d'un grand nombre de nœuds les capteurs collaborent en communiquant entre eux afin de transmettre de manière fiable les informations captées à la station de base. L'objectif principal est d'assurer des critères spécifiques, tels que le délai de bout en bout, qui représente le temps nécessaire pour qu'un paquet atteigne la station de base depuis un capteur. Cette opération est réalisée grâce au routage, qui est assuré par des algorithmes spécifiques. Ces capteurs apportent, entre autre, une perspective intéressante : celle d'être capables de s'auto configurer, de se gérer sans qu'il y ait besoin d'interventions humaines. En effet, ils sont autonomes et disposent pour cela d'une réserve énergétique, dont le renouvellement peut s'avérer impossible, ce qui limite leur durée de vie. Ainsi, l'optimisation de la consommation de cette énergie représente un facteur majeur qui a suscité l'intérêt de plusieurs travaux de recherches afin de maximiser la durée de vie individuelle du capteur et globale du réseau entier. A cet effet, une étude prospective sur les principaux facteurs influençant la consommation d'énergie dans RCSFs. Cela nous permettra d'évaluer les mécanismes de réduction de la consommation de l'énergie . Dans ce chapitre, nous présentons les différents concepts de base utilisés dans les RCSF ainsi que leurs différents domaines d'applications ,Nous examinons en détail la notion de routage , nous présentons un tour d'horizon sur les travaux de recherche portant sur les principaux facteurs influençant la consommation d'énergie ainsi que les mécanismes proposés pour sa minimisation et prolonger la durée de vie du réseau.

## 1.2 Les types des réseaux sans fil

### ➤ Réseaux Ad hoc :

Les réseaux de capteurs sans fil sont des réseaux ad-hoc dépourvus d'infrastructure fixe, composés d'un grand nombre de nœuds appelés capteurs. Ces capteurs, de petits dispositifs, sont déployés de manière aléatoire dans une zone de surveillance afin de collecter des données physiques, physiologiques ou environnementales telles que la glycémie, la température ou la pression atmosphérique, et de les transmettre à un centre de contrôle distant. Les capteurs sont caractérisés par des ressources de calcul très limitées, une mémoire de faible capacité et des batteries généralement non rechargeables et non remplaçables. Cette conception est nécessaire car les capteurs sont fréquemment déployés dans des zones difficiles d'accès pour les êtres humains [1].

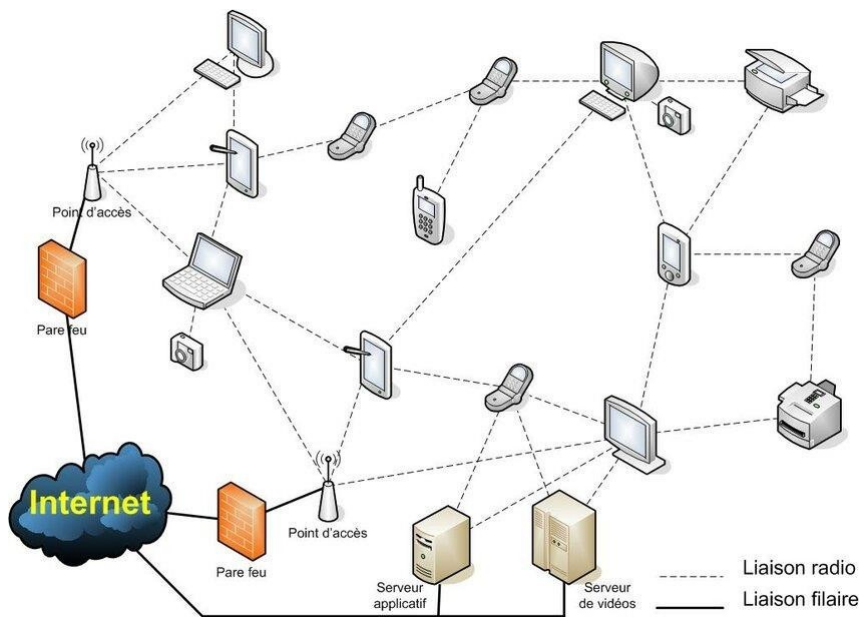


FIGURE 1.1 – Architecture d'un réseau sans-fil Ad hoc [1]

### ➤ Réseau de capteurs sans fils :

Les réseaux de capteurs sans fil composés d'un grand nombre de nœuds appelés capteurs. Ces capteurs, de petits dispositifs, sont déployés de manière aléatoire dans une zone de surveillance afin de collecter

des données physiques, physiologiques ou environnementales telles que la glycémie, la température ou la pression atmosphérique, et de les transmettre à un centre de contrôle distant. Les capteurs sont caractérisés par des ressources de calcul très limitées, une mémoire de faible capacité et des batteries généralement non rechargeables et non remplaçables. Cette conception est nécessaire car les capteurs sont fréquemment déployés dans des zones difficiles d'accès pour les êtres humains [2].

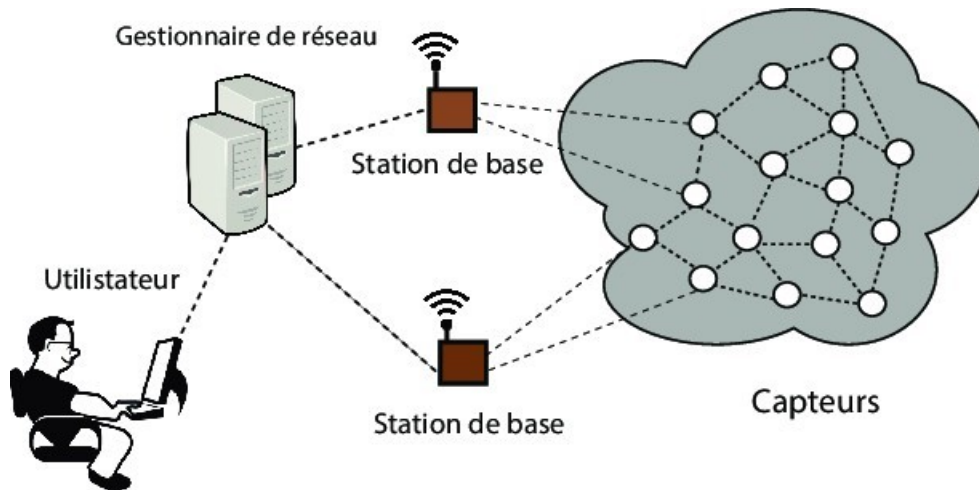


FIGURE 1.2 – Réseaux de Capteur Sans Fil RCSF [2]

### - Nœud-capteur

Un dispositif électronique de petite taille, appelé capteur sans fil, a la capacité de mesurer différentes grandeurs physiques de l'environnement telles que la température, la luminosité, la pression, l'humidité, les vibrations, et bien d'autres. Il est conçu pour transmettre ces données à un centre de contrôle en utilisant une station de base. Chaque capteur remplit trois fonctions fondamentales : l'acquisition des données, le traitement de ces données et leur transmission vers les stations de base. (voir la figure)[3].

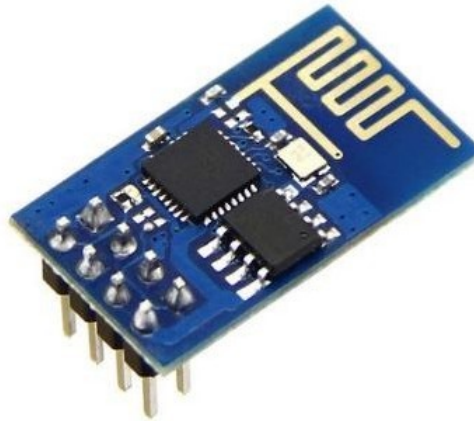


FIGURE 1.3 – Exemple de capteur sans fil [3]

### - Architecteur d'un nœud-capteur sans fils

Un « nœud capteur » contient quatre unités de base : l'unité d'acquisition, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Selon le domaine d'application, il peut aussi contenir des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie [4] .

#### ➤ Unité d'acquisition :

L'unité d'acquisition se compose d'un capteur chargé de recueillir des mesures numériques des paramètres environnementaux, ainsi que d'un convertisseur Analogique/Numérique qui convertit les données captées en une forme compréhensible par l'unité de traitement. Ces informations sont ensuite transmises à l'unité de traitement.

#### ➤ Unité de traitement :

L'unité de traitement est dotée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une

interface pour l'unité de transmission. Elle est également équipée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique. Son rôle est de récupérer les données provenant de l'unité d'acquisition et de les envoyer à l'unité de transmission pour la suite du traitement.

➤ **Unité de transmission :**

L'unité de transmission est responsable de toutes les opérations d'émission et de réception des données par le biais d'un support de communication radio. Elle assure la transmission des données collectées vers d'autres nœuds ou vers un point central, ainsi que la réception de données provenant d'autres nœuds du réseau.

➤ **L'unité de contrôle de l'énergie :**

cette unité a une importance capitale dans un réseau de capteurs, car elle gère une ressource énergétique limitée et extrêmement précieuse. Cette ressource a un impact direct sur la durée de vie des capteurs ainsi que sur la connectivité globale du réseaux.

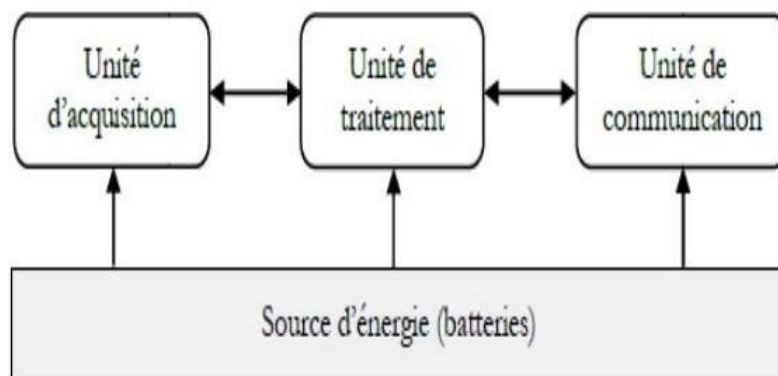


FIGURE 1.4 – Architecture d'un nœud-capteur[4]

### 1.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fils

Grâce à leur faible coût et à leur capacité de communication sans fil, les réseaux de capteurs ont pénétré de nombreux domaines d'application et ont également élargi les possibilités dans des domaines existants. Ces réseaux offrent des avantages significatifs et des contributions améliorées dans divers domaines tels que le domaine militaire, le secteur de la santé, la surveillance environnementale et les systèmes de maison intelligente [5] :

a **Applications militaires**

Dans des zones stratégiques ou d'accès difficile, le déploiement d'un réseau de capteurs offre la possibilité de surveiller tous les déplacements (tant des alliés que des ennemis) ou d'effectuer une analyse préalable du champ de bataille avant d'envoyer des renforts sur place. Différentes initiatives ont été initiées pour apporter un soutien aux forces militaires sur le terrain et garantir la sécurité des villes face aux diverses formes d'attaques, notamment les actes terroristes. L'un de ces projets pionniers dans les années 80 était le DSN (Distributed Sensor Networks) au sein du DARPA2, qui a exploré l'utilisation des réseaux de capteurs pour recueillir des données de manière décentralisée.

b **Applications médicales**

Dans le domaine de la médecine, les applications médicales des réseaux de capteurs sont multiples. Ils permettent une surveillance constante des fonctions vitales du corps humain en utilisant de minuscules capteurs qui peuvent être ingérés ou implantés sous la peau. Ces capteurs sont capables de surveiller en continu la glycémie, d'identifier précocement certains types de cancer et d'autres maladies. De plus, ils facilitent le diagnostic de diverses affections en mesurant des paramètres physiologiques tels que la pression artérielle et les battements cardiaques, grâce à des capteurs spécialisés. Les données collectées

par ces capteurs peuvent être stockées sur une longue période pour le suivi des patients. Par ailleurs, ces réseaux de capteurs sont également utiles pour détecter des comportements anormaux chez les personnes dépendantes, qu'il s'agisse d'une chute depuis un lit, d'un choc ou même d'un cri.

**c Applications à la surveillance**

L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité offre l'avantage de réduire significativement les coûts associés à la protection des personnes et des lieux. Par conséquent, en intégrant des capteurs dans des infrastructures majeures comme les ponts ou les bâtiments, il devient possible de détecter les fissures et les dégradations causées par des séismes ou le vieillissement de la structure. De même, le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alerte efficace pour détecter les intrusions dans une zone de surveillance. Cette approche permet ainsi d'améliorer la sécurité sans nécessiter des dépenses financières excessives.

**d Applications environnementales**

L'utilisation des réseaux de capteurs pour surveiller les paramètres environnementaux présente de nombreuses applications pratiques. Par exemple, en installant des capteurs thermiques dans une zone forestière, il est possible de repérer rapidement les débuts d'incendie, contribuant ainsi à prévenir la propagation des feux de forêt. De la même manière, le déploiement de capteurs chimiques dans les zones urbaines permet de détecter la pollution et d'effectuer des analyses de la qualité de l'air. Dans les installations industrielles, le déploiement de ces capteurs joue un rôle crucial dans la prévention des risques industriels tels que les fuites de gaz toxiques, de produits chimiques, d'éléments radioactifs ou de pétrole. Ces mesures de précaution sont essentielles pour protéger l'environnement et la santé publique .

**e les systèmes de maison intelligente** Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans de nombreux domaines, y compris celui des systèmes de maison intelligente. Les capteurs sans fil sont déployés dans les maisons pour collecter et transmettre des données sur divers aspects de l'environnement domestique, ce qui permet de créer un système de maison intelligente automatisé et interconnecté. Les applications des réseaux de capteurs sans fil dans les systèmes de maison intelligente comprennent la gestion de l'énergie, la sécurité, la surveillance de la santé, le contrôle de l'éclairage et de la température, ainsi que l'automatisation des tâches domestiques. Grâce à ces capteurs, il est possible de contrôler et de gérer à distance les différents appareils et équipements de la maison, d'améliorer l'efficacité énergétique, de renforcer la sécurité et de faciliter la vie quotidienne des habitants.

Les réseaux de capteurs sans fil jouent un rôle clé dans l'évolution des maisons traditionnelles vers des environnements domestiques plus intelligents et connectés, Ci-dessous une figure qui résume différents domaines d'application des réseaux de capteurs.

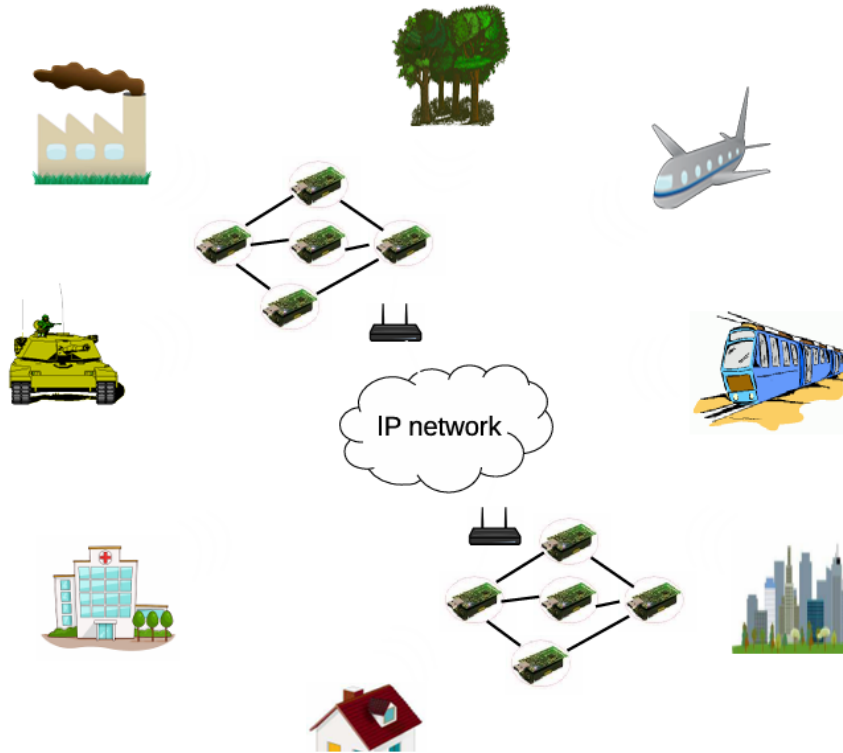


FIGURE 1.5 – Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fils [5]

## 1.4 Paramètres influençant la conception d'un RCSF

La conception et la mise en place d'un RCSF sont influencées par plusieurs paramètres qui dépendent généralement de l'application visée. Par conséquent, les solutions envisagées pour répondre aux exigences d'une application donnée, sont conditionnées par les paramètres de cette dernière. Autrement dit, l'application reste l'élément le plus influent pour la conception des protocoles du réseau de capteurs considéré. Néanmoins, certaines contraintes restent communes à plusieurs applications :

- **Durée de vie** : C'est la contrainte fondamentale d'un réseau de capteurs. Elle dépend essentiellement du type de l'application. Elle est liée à la durée de vie des capteurs qui sont munis de batteries difficiles à recharger ou remplacer. La durée de vie des RCSF est fortement liée à la dispersion des distances entre les capteurs et la station de base.
- **Facteur d'échelle** : De façon générale, les réseaux de capteurs sont composés de quelques dizaines à quelques centaines de nœuds. Cependant, il existe des applications qui exigent l'utilisation de centaines ou de milliers de nœuds. La zone que doit couvrir le réseau est donc déterminante dans son dimensionnement et les protocoles de routage doivent pouvoir fonctionner indépendamment de la densité des nœuds.
- **Tolérance aux pannes** : Pour des raisons énergétiques ou autre (endommagé, détruit) un nœud capteur peut cesser de fonctionner. Le réseau doit être capable de tenir compte de toutes ces modifications et d'assurer une qualité de service égale. La redondance est généralement la solution proposée pour assurer cette fonction. Les capteurs devront adapter leur niveau de tolérance proposée aux pannes en fonction du milieu de déploiement du réseau.
- **Faible consommation d'énergie** : La plupart des applications exigent une durée de vie très longue. C'est pour cette raison que la minimisation d'énergie est la contrainte la plus importante pour le développement des protocoles même au détriment de la qualité de service fournie. Aujourd'hui, les chercheurs visent à extraire l'énergie de l'environnement (lumière intérieure ou extérieure, bruit



acoustique, vibrations mécaniques, etc.). La production d'énergie au niveau du capteur est donc très certainement un axe d'avenir important, elle reste cependant très marginale aujourd'hui et les travaux proposés dans cette thèse vont donc se concentrer sur la minimisation de la consommation d'énergie, avec l'hypothèse de capteurs non rechargeables.

- Faible coût : Les réseaux de capteurs sont formés par un nombre important de capteurs. Par conséquent, il faut avoir un coût unitaire minimal pour avoir un coût global raisonnable.
- Auto-configuration : La probabilité de panne d'un nœud capteur ou le rajout des nœuds font que la topologie du réseau doit pouvoir changer dynamiquement. Les réseaux de capteurs doivent être capables de configurer tous leurs paramètres en fonction de leur environnement d'installation. Le réseau doit pouvoir identifier la position des capteurs, intégrer des nouveaux nœuds et tolérer les pannes. Les configurations manuelles ne sont donc pas envisageables.
- Faible complexité matérielle et logicielle : La capacité de la batterie d'alimentation du capteur est une contrainte matérielle majeure sachant que le volume du nœud capteur n'excède pas celui d'une boîte d'allumettes. Par conséquent, les fonctionnalités mises en œuvre par la partie matérielle doivent être aussi simples que possible, car l'augmentation de la complexité de cette dernière ou de la partie logicielle peut engendrer une forte augmentation de la consommation d'énergie.
- L'environnement de déploiement : L'environnement de déploiement des nœuds capteurs varie d'une application à l'autre : il peut être au fond de l'océan, sur un champ de bataille, à l'intérieur d'une grosse machine, dans un bâtiment, dans un lieu contaminé biologiquement ou chimiquement, dans une maison ou un immeuble, sur un véhicule, etc. Ces situations très variées imposent des contraintes très fortes de l'environnement sur les capteurs.

## 1.5 La qualité de service dans les réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sont des réseaux constitués de nœuds qui ont des contraintes importantes en termes de calcul, d'énergie, de stockage, etc. Chaque capteur génère des données (température, pression, humidité, bruit, éclairage, etc.) qu'il doit ensuite transmettre à une ou plusieurs stations de base via des communications multi-sauts. Les liens sans fil dans ces réseaux ont un faible débit et un taux de perte élevé. Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans des applications nécessitant des opérations complexes, telles que les soins de santé et la surveillance industrielle. Cependant, répondre aux exigences de qualité de service (QoS) de ces applications est difficile en raison des ressources très limitées des capteurs sans fil, de la mauvaise qualité des liens radio et des environnements de déploiement. Cela présente de nouveaux défis en matière de garantie de la QoS dans ces réseaux [6].

### 1.5.1 Aperçu sur la qualité de service (QoS) :

En télécommunication, l'objectif de la qualité de service (QoS) est d'améliorer les performances de la communication afin d'acheminer correctement le contenu et d'utiliser de manière optimale les ressources du réseau. La QoS a été définie par le CCITT (Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique) comme "l'effet global des performances d'un service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur". Elle peut également être définie comme la capacité d'un élément du réseau, tel qu'un routeur, un nœud ou une application, à garantir un niveau de performance pour la transmission des données. L'objectif est d'assurer une expérience utilisateur satisfaisante en termes de débit, de latence, de fiabilité et d'autres paramètres de performance. La QoS joue un rôle crucial dans les réseaux de télécommunication pour répondre aux besoins spécifiques des applications et des utilisateurs finaux. Selon [7] La qualité de service est influencée par plusieurs facteurs qui peuvent être classés en deux catégories : les facteurs humains et les facteurs techniques. Les facteurs humains, tels que la stabilité du service, le délai et la disponibilité, sont subjectifs car ils dépendent de la satisfaction de l'utilisateur final, qui peut varier d'une personne à l'autre ou dans différentes situations pour une même personne. En revanche, les facteurs techniques sont mesurables et permettent une évaluation objective et plus précise. Ces facteurs techniques comprennent la fiabilité, l'extensibilité (scalabilité), l'efficacité, et d'autres aspects similaires. Ils jouent un

rôle crucial dans l'évaluation de la qualité de service et permettent de déterminer le niveau de performance et de satisfaction des utilisateurs. En prenant en compte à la fois les facteurs humains et techniques, il est possible de fournir une expérience utilisateur optimale et de répondre aux attentes des utilisateurs finaux.

### 1.5.2 Métriques de QoS :

Les métriques de qualité de service (QoS) sont des facteurs utilisés pour évaluer la performance des algorithmes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs). Elles permettent de mesurer la qualité de l'acheminement des données à travers le réseau. Parmi les différentes métriques existantes, certaines sont couramment utilisées dans divers algorithmes de routage. Voici une explication détaillée de ces métriques :

- **Consommation d'énergie :** La consommation d'énergie est un aspect crucial lors de l'élaboration de nouveaux protocoles pour les réseaux de capteurs, car elle a un impact direct sur la durée de vie du réseau. En effet, si un capteur se retrouve sans énergie, cela entraînera une défaillance du réseau. Par conséquent, l'objectif principal est de minimiser la consommation d'énergie de chaque nœud du réseau. Cette métrique, représentée par l'énergie moyenne consommée par chaque nœud, permet d'évaluer l'efficacité énergétique du protocole mis en place. En optimisant la consommation d'énergie, il est possible de prolonger la durée de vie des capteurs et de maximiser l'utilisation des ressources énergétiques limitées. Ainsi, la conception de protocoles écoénergétiques est essentielle pour assurer un fonctionnement durable et efficace des réseaux de capteurs.
- **Délai de bout en bout :** cette mesure est extrêmement importante. Par exemple, dans le cas de la détection de fuites de gaz chimiques, il est important d'obtenir l'information le plus rapidement possible afin de prendre les mesures nécessaires pour résoudre l'incident. Un délai de bout en bout élevé peut entraîner un retard dans la détection de la fuite, ce qui peut conduire à des conséquences graves. La métrique du temps total évalue la moyenne du délai nécessaire pour que les données se déplacent du point d'origine vers le point de destination.
- **Taux de fiabilité :** Il s'agit d'un rapport qui exprime la relation entre le nombre de données différentes reçues par le nœud de destination et le nombre de données envoyées par la source. Cette mesure permet d'évaluer l'efficacité de la transmission des données. On peut également trouver d'autres termes pour désigner cette mesure, tels que le taux de livraison des paquets (PDR). Le PDR indique le pourcentage de paquets de données envoyés par la source qui parviennent effectivement au nœud de destination sans perte ou duplication [8]. Prenons l'exemple d'un protocole de routage utilisé dans les réseaux de capteurs. Dans ce contexte, il est crucial de réduire au maximum la perte de paquets de données lors de leur transfert depuis un capteur vers le point de collecte des données (aussi appelé nœud puits). En effet, les informations transmises peuvent revêtir une importance capitale. Imaginons un capteur chargé de mesurer des distances. Si ce capteur n'envoie pas toutes les distances mesurées, sa crédibilité en tant que source de données fiable en serait affectée. Par conséquent, il est essentiel d'assurer un transfert complet et précis des données pour garantir la fiabilité des capteurs et des informations collectées.
- **La gigue :** La gigue est une mesure qui représente les variations de latence entre les paquets de données. Elle indique la différence de temps de transit entre différents paquets, certains étant acheminés rapidement tandis que d'autres prennent plus de temps à atteindre leur destination. En d'autres termes, la gigue mesure les fluctuations de délai dans la transmission des paquets, ce qui peut entraîner des variations de vitesse de transfert des données [9].

## 1.6 Le routage dans Les réseaux de capteurs sans fils

### 1.6.1 Définition du routage :

Le routage est un mécanisme essentiel qui consiste à choisir des chemins au sein d'un réseau afin

de transférer des données depuis un expéditeur vers un ou plusieurs destinataires. Son efficacité revêt une grande importance dans les réseaux où l'information ne provient pas d'une seule source, mais est échangée entre différents agents indépendants. L'objectif est d'acheminer les données de manière optimale, en minimisant les délais, les pertes de paquets et les congestions, tout en assurant une bonne connectivité entre les nœuds du réseau. Les algorithmes de routage peuvent varier en fonction des caractéristiques du réseau et des objectifs spécifiques à atteindre [10] .

★ **Exemple 1**

Si on suppose que les coûts des liens sont identiques, le chemin indiqué dans la figure suivante est le chemin optimal reliant la station source et la station destination. Une bonne stratégie de routage utilise ce chemin dans le transfert des données entre les deux stations. Pour comprendre c'est quoi le routage, c'est simple, on suppose qu'on a 7 nœuds qui sont reliés par des arcs qui représentent les routes possibles comme nous le montre la figure ci-dessous :

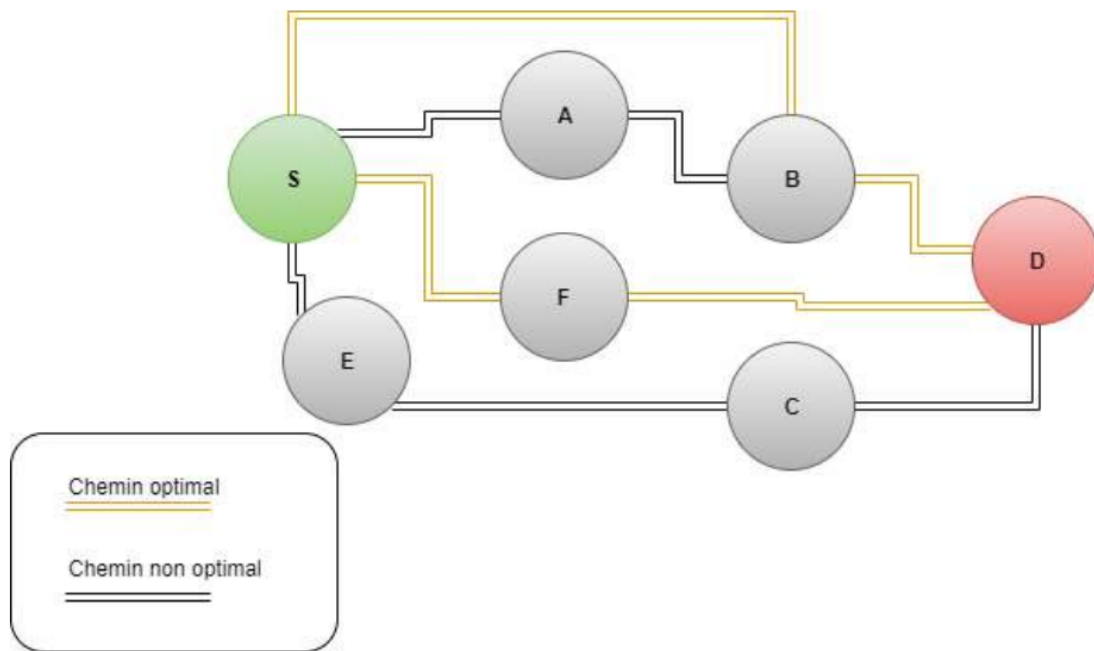


FIGURE 1.6 – Graphe représentatif du routage, dans un réseau de 7 nœuds

Notre objectif est d'atteindre le point D en partant du Point S en optimisant la distance (le plus court chemin) afin que la communication soit optimale entre S et D, on suppose que tous les arcs qui relient deux entités sont égaux. La route optimale entre S et D serait donc celle qui cumule le moins d'arcs en ayant comme départ le point S pour arriver au point D.

### 1.6.2 Facteurs influençant la conception d'un protocole de routage

La fonction de routage a un rôle important dans la maximisation de la durée de vie des capteurs et du réseau entier. Par conséquent, il faut concevoir un protocole de routage performant en termes de latence, coût énergétique, débit, choix des routes optimales pour l'acheminement des données, passage à l'échelle, etc. L'énergie est une contrainte très importante pour les réseaux ad hoc, et en particulier pour les RCSF. Le routage assure la distribution du trafic sur plusieurs routes pour garantir plus d'équilibre en consommation d'énergie entre les nœuds fixes ou mobiles dans le réseau. Mais, la sélection d'une route selon le critère de plus court chemin a un effet néfaste sur la connectivité et sur la durée de vie du réseau à cause de la surutilisation des ressources énergétiques de quelques nœuds en faveur d'autres. Cela provoque l'épuisement de l'énergie de certains nœuds avant les autres et par conséquent le partitionnement du réseau. Notre objectif n'est pas seulement d'optimiser la consommation d'énergie totale mais aussi d'assurer l'utilisation équitable des nœuds et de maximiser la durée de vie du réseau entier.

### 1.6.3 Classification des protocoles de routage pour les RCSFs

#### Les protocoles de routage non géographique

Ces protocoles sont basés sur la topologie du réseau où les nœuds n'ont pas une connaissance de leurs positions géographiques ni de celles des autres nœuds. La découverte de topologie se fait alors par échange de messages entre voisins. Ces protocoles peuvent être classés en trois familles :

- Proactif : Ces protocoles établissent les routes à l'avance en se basant sur l'échange périodique des tables de routage. Parmi ces protocoles nous pouvons citer Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) [11].
- Réactif : Ces protocoles créent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de routes est lancée. La recherche des chemins nécessite un temps de latence important. Adhoc On-demand Distance Vector (AODV), Ad-hoc On-demand Multi-path Distance Vector (AOMDV), et Dynamic Source Routing (DSR) sont des protocoles appartenant à cette famille.
- Hybride : Il regroupe les protocoles héritant des avantages des protocoles proactifs et réactifs. Les protocoles ZRP [12], ZHLS [13] et LANMAR [14] sont des exemples de protocoles hybrides.

Dans la suite, nous présentons les protocoles AODV et AOMDV qui sont très utilisés dans les RCSF

##### ➤ AODV [11]

AODV est un protocole unicast destiné aux réseaux ad-hoc mobiles ; il est basé sur les algorithmes DSDV. Il réduit le nombre de diffusions de messages, et cela en créant les routes lors du besoin, contrairement au DSDV qui maintient la totalité des routes. Ce protocole présente l'avantage de ne pas nécessiter la transmission périodique de messages de routage sur un réseau statique. En outre, il ne dispose pas de ressources de calcul et de mémoire importantes ce qui le rend plus adapté pour des réseaux de capteurs. AODV est moins gourmand en énergie que TORA (Temporally-Ordered Routing Algorithm), DSDV et DSR (Dynamic Source Routing).

##### ➤ AOMDV

AOMDV [11] est une version multipath d'AODV. L'avantage d'utiliser AOMDV est qu'il permet aux nœuds intermédiaires de répondre à RREQ (Routing REQuest), tout en sélectionnant des chemins disjoints. En effet, il construit plusieurs routes sans boucles de routage au niveau des sources de trafic et des nœuds intermédiaires, contrairement à l'AODV qui construit et maintient une seule route seulement pour chaque couple (source, destination). Une nouvelle découverte de route n'est nécessaire que si toutes les routes deviennent non valides. Ceci réduit considérablement les latences et la surcharge de la procédure de découverte. AOMDV nécessite plus de messages au cours de la phase de découverte de route due à une augmentation des requêtes, puisqu'il s'agit d'un protocole de routage multi-chemins et que la destination doit répondre aux multiples RREQs. Par contre, AOMDV garantit un meilleur routage à la demande puisqu'il fournit plusieurs chemins alternatifs en cas de rupture d'un en cours de la transmission des données.

#### Les protocoles de routage géographique

Pour cette classe de protocoles de routage, chaque nœud connaît son propre emplacement géographique à l'aide d'un système de localisation tel que le GPS (Global Positioning System) ou un système de localisation ad-hoc [15]. Chaque nœud désirent émettre connaît aussi la localisation de ses voisins et de la destination. La découverte de localisation des voisins se fait de façon périodique ou à la demande. Les messages envoyés pour découvrir la position des voisins augmentent l'overhead des protocoles géographiques. Cette famille de protocoles sort du cadre de notre étude puisqu'elle n'est pas optimale pour les RCSF.

## Les protocoles de routage basés sur des mécanismes de clustering

### A. Les algorithmes de routage basés sur les clusters hiérarchiques

- **LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)** : Le protocole LEACH [16] est le plus populaire des protocoles de routage hiérarchique dans les RCSF. Il se base sur le partitionnement dynamique du réseau en un ensemble de clusters.

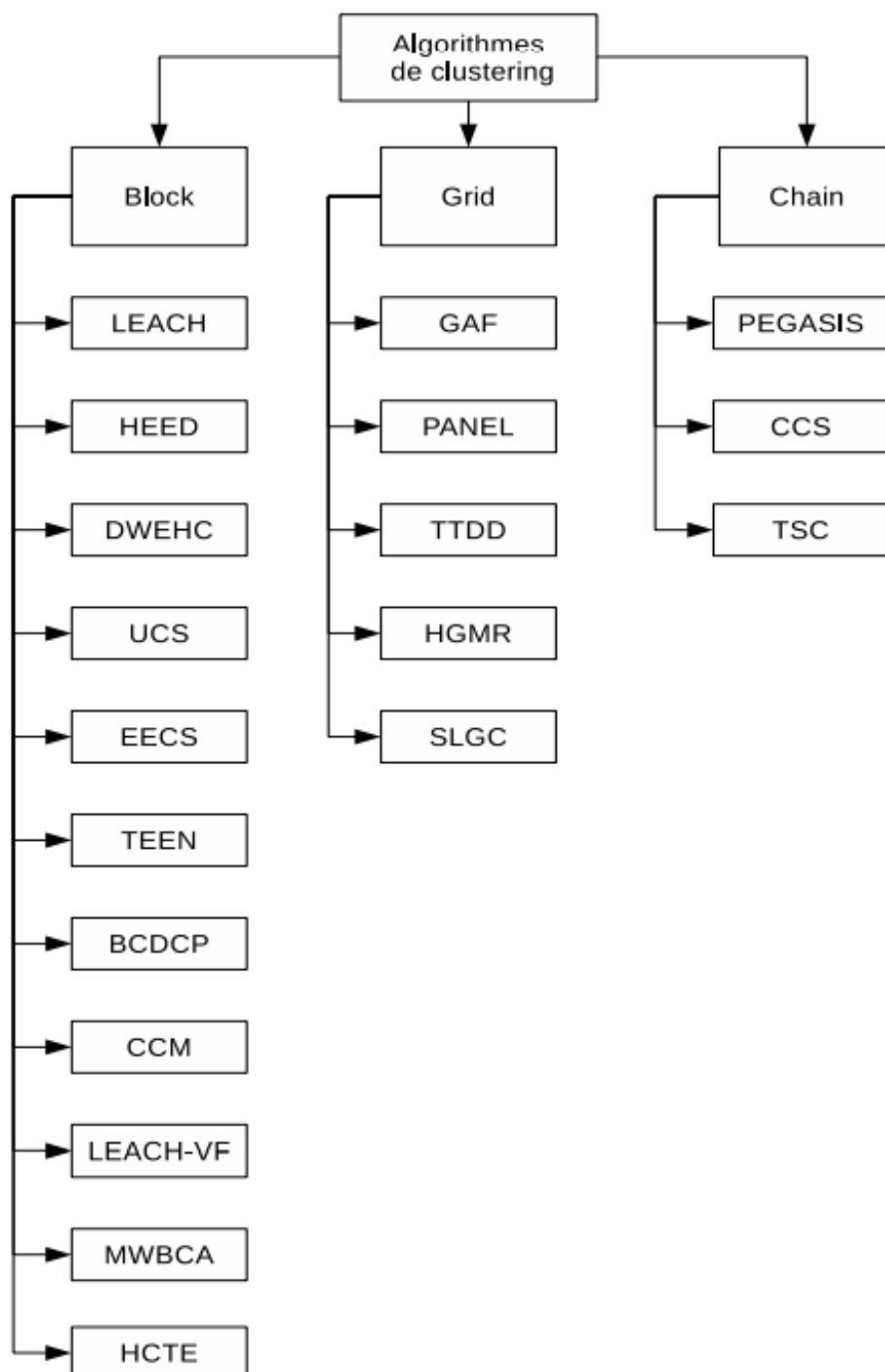


FIGURE 1.7 – Algorithmes de routage basés sur des mécanismes de clustering

En effet, il fournit un équilibrage de la consommation d'énergie par rotation aléatoire du rôle de cluster-head (CH). La décision de devenir clusterHead ou non est prise de façon autonome par chaque nœud afin de diminuer l'overhead. Ainsi, chaque nœud  $n$  choisit un nombre aléatoire comprise dans l'intervalle  $[0,1]$ , si ce nombre est inférieur à une valeur  $T(n)$ , le nœud devient Cluster-Head (CH).  $T(n)$  est défini comme suit :

$$T(x) = \begin{cases} \frac{P}{1-P(r \bmod \frac{1}{P})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.1)$$

où  $P$  désigne le pourcentage désiré en nombre de CHs pendant un round,  $r$  est le numéro du round dans le temps et  $G$  est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élus CHs pendant les  $1/P$  rounds précédents. Chaque nœud élu comme CH diffuse son statut à ses voisins. Les messages de diffusion et d'établissement de cluster sont transmis en utilisant la technique CSMA/CA permettant ainsi d'éviter de probables collisions et interférences entre les CHs adjacents. Les nœuds membres regroupent les messages reçus et choisissent le cluster auquel vont appartenir. Cette décision est prise sur la base d'amplitude du signal reçu. En effet, le CH ayant diffusé le signal de plus grande amplitude (le plus proche) sera choisi. Le CH crée un programme de transmission basé sur la technique TDMA et le diffuse à ses nœuds membres. Ces derniers communiquent leurs données vers les CHs correspondant en respectant chacun le time slot qui lui est attribué. Les données reçues au niveau de chaque CH sont agrégées puis transmises à la station de base ce qui permet d'optimiser la consommation d'énergie et d'augmenter la durée de vie du réseau. Cependant des critiques ont été apportées au protocole LEACH relatives à ses hypothèses contraignantes de départ. Ainsi, la distribution des CH est basée sur une variable aléatoire ce qui peut engendrer une concentration des CHs dans une région au détriment des autres. LEACH utilise un routage à un saut ce qui n'est pas adapté aux réseaux à grande échelle car la communication avec des nœuds lointains nécessitent une forte consommation d'énergie. L'agrégation des données au niveau des CHs favorise la sur-utilisation des ressources énergétiques de quelques nœuds en faveur d'autres. Plusieurs variantes de LEACH (Figure 1.7) ont été proposées pour pallier aux problèmes de la version originale, à savoir, les différents descendants de LEACH [17] qui sont présentés dans le tableau 1.1. L'idée proposée par LEACH a été aussi une inspiration pour de nombreux protocoles de routage hiérarchiques. Parmi ces protocoles nous pouvons citer :

- **HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)** : L'objectif principal de ce protocole [18] est de prolonger la durée de vie du réseau. Donc, il utilise une meilleure distribution des clusters. La sélection des CHs est basée sur l'énergie résiduelle de chaque nœud et le coût de communication Intra-Cluster. Par conséquent, le niveau d'énergie résiduelle du CH est supérieur à celui des nœuds membres. En outre, HEED utilise la même technique de communication que LEACH.
- **EECS (Energy Efficient Clustering Scheme)** : Ce protocole [19] est une extension de LEACH mais diffère de ce dernier par le fait que le choix des CHs est basé sur l'énergie résiduelle. Les nœuds ayant le plus d'énergie sont favorisés par rapport à ceux qui sont plus proche de la station de base pour devenir CH. D'où une meilleure distribution d'énergie dans tout le réseau.

## B. Les algorithmes de routage basés sur les clusters en grille

- **PANEL (Position-based Aggregator Node Election scheme)** : PANEL [20] est un algorithme de routage pour les RCSF. La sélection des CHs est basée sur des informations de localisation. Le partitionnement du réseau en clusters est déterminé avant le déploiement des nœuds. Pour assurer une utilisation équitable des ressources, l'opération de sélection de cluster est répétée à chaque intervalle de temps.
- **SLGC** : Cet algorithme de clustering [21] organise le réseau en des grilles où le CH est le responsable de l'émission des données dans chaque cluster. Il se déroule suivant deux étapes : pendant la première étape les CHs sont déterminés et les clusters seront formés alors que pendant la deuxième étape le CH collecte les données des nœuds membres et les transmet à la station de base à un seul saut.

S.N	LEACH et ses descendants	Abréviation	Date Publi
1	LEACH	Low energy adaptive clustering hierarchy	2002
2	LEACH-C	Centralized - Low energy adaptive clustering hierarchy	2002
3	LEACH-F	Fixed no. Of Cluster- Low energy adaptive clustering hierarchy	2002
4	LEACH-B	Balanced- Low energy adaptive clustering hierarchy	2003
5	LEACH-ET	Energy threshold- Low energy adaptive clustering hierarchy	2006
6	LEACH-E	Energy- Low energy adaptive clustering hierarchy	2007
7	TL-LEACH	Three Layer- Low energy adaptive clustering hierarchy	2007
8	A -s LEACH	Advanced-solar aware- Low energy adaptive clustering hierarchy	2007
9	S- LEACH [	Secure- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
10	Trust Based - LEACH	Trust Based- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
11	LEACH-DCHS-CM	Cluster maintenance - Low energy adaptive clustering hierarchyDCHS	2008
12	TB- LEACH	Time based- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
13	MAT- LEACH	Mobile agent based- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
14	Armor- LEACH	Advance LEACH routing protocol for micro-sensor networks	2008
15	LEACH-Mobile	Low energy adaptive clustering hierarchy-Mobile	2008
16	A-LEACH	Advanced- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
17	ME- LEACH-L	More energy efficient - Low energy adaptive clustering hierarchy-L	2008
18	Re-cluster-LEACH	Re-cluster- LEACH- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
19	LEACH-H	Low energy adaptive clustering hierarchy-H	2008
20	O- LEACH	Optical- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
21	LEACH-TM	Low energy adaptive clustering hierarchy-trust-minimum transmission	2008
22	MS- LEACH	Combination of multi-hop and single hop- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
23	Hybrid-LEACH	Hybrid- Low energy adaptive clustering hierarchy	2008
24	LEACH-D	Low energy adaptive clustering hierarchy-D	2008
25	P-LEACH	Low energy adaptive clustering hierarchy-partition	2009
26	MR- LEACH	Adaptive cluster-head election and two hop transmission- Low energy adaptive clustering hierarchy	2009
27		Multi-hop hop routing- Low energy adaptive clustering hierarchy	2009
28	HPR- LEACH	Heterogeneous- Low energy adaptive clustering hierarchy	2009

TABLE 1.1 – LEACH et ses descendants

### C. Les algorithmes de routage basés sur les clusters en chaînes

- **PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) :** PEGASIS [22], est une version améliorée de LEACH où les nœuds sont organisés en une chaîne. L'idée principale de PEGASIS est que chaque nœud communique uniquement avec ses voisins proches et seul le CH de la chaîne est chargé de la transmission à la station de base. Par conséquent, la charge de l'énergie est uniformément répartie entre tous les nœuds qui sont placés de façon aléatoire. Ce protocole atteint rapidement ses limites de fonctionnement dans le cadre des réseaux fortement denses.

- **CCS (Concentric Clustering Scheme)** : Ce protocole [23] est une extension de PEGASIS qui vise à réduire la consommation d'énergie par rapport à ce dernier. Le concept principal de CCS est de prendre en considération l'emplacement de la station de base pour réduire la consommation d'énergie d'émission et augmenter la durée de vie du réseau.

Le tableau 1.2 illustre une comparaison entre des algorithmes de routage basés sur le mécanisme de clustering en termes de scalabilité, efficacité énergétique, délai, complexité d'algorithme et stabilité du cluster.

Protocols	stabilité du Cluster	Scalabilité	Délai	Complexité	Efficacité énergétique
LEACH	Moyenne	Très faible	Très faible	faible	Très faible
HEED	forte	Moyenne	Moyen	Moyenne	Moyenne
DWEHC	forte	Moyenne	Moyen	Moyenne	Très forte
UCS	forte	faible	faible	Moyenne	Très faible
EECS	forte	faible	faible	Très élevée	Moyenne
TEEN	forte	faible	faible	élevée	Très forte
BCDCP	forte	Très faible	faible	Très élevée	Très faible
CCM	forte	Très faible	faible	Moyenne	Très faible
LEACH-VF	forte	Très faible	Très faible	Moyenne	Moyenne
MWBCA	Moyenne	Très faible	Très faible	Moyenne	Moyenne
HCTE	Moyenne	Très faible	Très faible	Moyenne	Très faible
GAF	Moyenne	forte	faible	Moyenne	Moyenne
PANEL	faible	faible	moyen	élevée	Moyenne
TTDD	très forte	faible	Très large	faible	Très faible
HGMR	forte	très forte	moyen	faible	faible
SLGC	Moyenne	Très faible	Très faible	moyenne	moyenne
PEGASIS	faible	Très faible	Très large	élevée	faible
CCS	faible	faible	large	moyenne	faible
TSC	Moyenne	moyenne	moyen	moyenne	moyenne

TABLE 1.2 – Comparaison entre les protocoles de routage basés sur le clustering

## 1.7 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont largement adoptés dans divers domaines en raison de leurs nombreux avantages. Dans ce chapitre, nous avons exploré les concepts fondamentaux des RCSF et nous nous sommes particulièrement penchés sur le routage, un aspect critique pour assurer la continuité du service dans ces réseaux. Les RCSF se distinguent des autres réseaux par leur source d'énergie limitée et souvent non remplaçable. L'objectif ultime de notre travail est la minimisation de la consommation d'énergie. Dans le contexte du routage avec Qualité de Service (QoS) dans les RCSF, nous avons choisi d'adopter une approche basée sur la théorie des jeux. Le prochain chapitre se concentrera sur une étude approfondie de cette approche, en explorant ses concepts fondamentaux et en détaillant sa mise en œuvre.



# Chapitre 2

## *Généralités sur la théorie des jeux*

### 2.1 Introduction

Dans divers contextes de la vie quotidienne, les performances d'individus, d'entreprises ou même de pays ne résultent pas uniquement de leurs actions isolées, mais également des décisions prises par d'autres acteurs. Cette notion d'interdépendance stratégique constitue le champ d'application central de la théorie des jeux. Au cours des dernières décennies, cette théorie a profondément influencé un large éventail de disciplines, incluant les sciences économiques, la gestion, la recherche opérationnelle, l'ingénierie, les sciences politiques, l'informatique et la biologie, entre autres. Ainsi, la maîtrise de la théorie des jeux est désormais essentielle pour quiconque souhaite explorer ces domaines de connaissance et en comprendre les mécanismes fondamentaux.

Lorsque les actions des acteurs décisionnaires au sein d'un environnement interactif s'influencent mutuellement dans le cadre de leurs activités, et que chacun d'entre eux aspire à optimiser ses propres gains, cela peut graduellement affaiblir les performances globales de cet environnement, entraînant une dégradation individuelle pour chaque acteur. Dans de telles circonstances où les actions d'un acteur peuvent impacter les décisions des autres, l'utilisation de la théorie des jeux s'avère hautement avantageuse. En effet, la théorie des jeux offre un outil analytique pour examiner les situations conflictuelles en se basant généralement sur le principe de la rationalité individuelle.

Dans ce contexte, chaque agent actif prend des décisions qui dépendent non seulement des conditions environnementales, mais également des choix opérés par les autres agents, en vue d'optimiser son utilité. Par exemple, prenons le cas d'un marché impliquant un vendeur et un consommateur. Le vendeur adoptera une stratégie visant à maximiser son profit face à la concurrence, comme en fixant le prix de vente optimal. De son côté, le consommateur cherchera à acquérir le bien désiré au prix le plus bas après des négociations avec le vendeur. Dans cet exemple, chaque participant sur le marché agit conformément au principe de rationalité économique, c'est-à-dire en prenant les décisions qui maximisent son intérêt personnel. Ce même principe s'applique à un joueur d'échecs qui vise la victoire dans la partie et qui choisit les mouvements qu'il considère les plus efficaces pour y parvenir.

Ceci illustre précisément le paradigme de la théorie des jeux : le modélisateur attribue des fonctions de gain et des stratégies aux participants, qui observent les conséquences de leurs choix stratégiques afin d'obtenir le gain maximal dans une situation donnée.

La théorie des jeux constitue une branche des mathématiques appliquées qui a vu le jour en 1944 grâce aux travaux de Von Neumann et Oscar Morgenstern, lesquels ont publié l'article "Theory of Games and Economic Behavior". Depuis cette date, elle s'est révélée comme une nouvelle discipline dotée d'applications variées, englobant des domaines tels que l'économie, les domaines militaire, biologique et politique [24]. L'élaboration de modèles mathématiques simples se profile comme l'un des objectifs centraux de la théorie des jeux. Ces modèles s'efforcent de synthétiser l'ensemble des composantes nécessaires pour expli-

quer des interactions spécifiques. Ils proposent ensuite des concepts de solutions pour prédire les résultats probables des interactions et appliquent ces outils pour une meilleure appréhension et gestion des phénomènes étudiés. L'objectif de ce chapitre est de présenter les éléments essentiels de la théorie, quelques classes des jeux ainsi que les concepts de solution les plus utilisés notamment l'équilibre de Nash nous avons exposé aussi quelques applications de cette théorie dans le domaine informatique.

## 2.2 Notions de base de la théorie des jeux

L'analyse des conflits qui peuvent se produire entre des acteurs engagés dans des interactions est le cœur même de la théorie des jeux. Cette discipline repose principalement sur les concepts suivants :

- **Un jeu** : Un jeu est un ensemble de relations entre décideurs (joueurs). La description du jeu comprend des informations sur les ressources et les préférences de chaque joueur, La description complète d'un jeu englobe à la fois les règles qui gouvernent les interactions entre les joueurs et celles qui régissent les conséquences des actions par les joueurs. Toutes ces règles sont intégrées dans la description du jeu, fournissant ainsi un cadre structuré pour les interactions et les résultats du jeu [25],
- **Un joueur** : Un "joueur" représente tout individu ou entité participant au jeu, qui est habilité à prendre des décisions. Le joueur constitue l'élément de base de prise de décision et peut prendre différentes formes, telles qu'une personne physique, un groupe de personnes, une entreprise, un agent informatique, un objet connecté, un nœud de réseau ou toute autre entité pertinente dans le contexte du jeu [26], l'ensemble des joueurs en général est noté par  $I = \{1, \dots, n\}$  avec  $n$  est le nombre total des joueurs.
- **Une stratégie** : une stratégie est un plan d'actions spécifiant l'ensemble des décisions que doit prendre le joueur au cours du jeu. Il existe deux types de stratégies [27] :
  - **Stratégie pure** : une stratégie pure du joueur  $i$  est un plan d'action qui prescrit une action de ce joueur pour chaque fois qu'il est susceptible de jouer. On note par  $S_i$  l'ensemble des stratégies pures du joueur  $i$  et par  $s_i$  une stratégie pure de ce joueur et on note par  $s_{-i} = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_n)$  l'ensemble des stratégies de tous les joueurs, sauf la stratégie du joueur  $i$ ;
  - **Stratégie mixte** : une stratégie mixte du joueur  $i$  est une distribution de probabilités  $P_i$  définie sur l'ensemble des stratégies pures du joueur  $i$ . On note par  $\alpha_i$  une stratégie mixte de ce joueur. Notons  $P_i(s_k)$  la probabilité que le joueur  $i$  joue la stratégie  $s_k$  et par  $\Delta_i = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  l'ensemble des stratégies mixtes du joueur  $i$ . ou  $n_i$  est le nombre de stratégies pures du joueur  $i$ , et  $\alpha$  représente une stratégie mixte de ce joueur
- **Utilité (gain)** : pour chaque joueur  $i$  correspond une fonction d'utilité  $u_i$

$$u_i : S_1 \times \dots \times S_n \rightarrow R \quad (2.1)$$

qui associe un gain pour chaque profil de stratégie  $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ .

**Rationalité** : on dit qu'un joueur possède un comportement rationnel s'il est conscient des alternatives et choisit délibérément la stratégie qui lui est le plus favorable parmi son ensemble d'actions.

## 2.3 Les différents types de jeu :

La théorie des jeux se subdivise en plusieurs catégories en fonction de divers critères tels que le nombre de joueurs, le nombre de stratégies, le type de relation entre les joueurs, le type de gains, la forme des fonctions de gains, le nombre d'étapes dans le jeu et l'état d'information. Les différentes principales classes de jeux sont comme suit :

### 2.3.1 Jeux coopératifs ou non coopératifs :

Un jeu est considéré comme coopératif si les joueurs ont la capacité de former des accords contraignants entre eux. Par exemple, si les nœuds s'entendent sur l'utilisation d'un lien particulier pour le transport de leurs données, tout en laissant les autres liens disponibles. Dans ce cas, on peut dire que les joueurs ont formé une coalition [24], le jeu est qualifié de non coopératif lorsque les joueurs ne peuvent pas former de coalitions. Dans ce type de jeu, nous détaillons toutes les options stratégiques disponibles pour les joueurs, contrairement aux jeux coopératif. Dans un jeu non coopératif, les joueurs peuvent convenir de résultats spécifiques du jeu, à condition que ces accords ne soient pas légalement contraignants. Il est également possible qu'un jeu non coopératif prenne la forme d'un jeu standard (stratégique) ou étendu [28].

### 2.3.2 Jeu à information parfaite ou imparfaite :

Ce regroupement de jeux peut être divisé en deux catégories distinctes : les jeux d'information parfaite et les jeux d'information imparfaite. Dans les jeux d'information parfaite, chaque joueur possède une compréhension complète de l'historique des actions et des décisions qui ont précédé le moment de sa propre décision. Chaque nœud de l'arbre de jeu est exposé aux participants, offrant une transparence totale de la situation. En revanche, lorsque les joueurs ne disposent pas d'une connaissance complète des décisions prises par leurs pairs, le jeu est qualifié d'information imparfaite. Dans cette situation, un joueur peut atteindre un point de décision sans avoir toutes les informations nécessaires sur les mouvements des autres joueurs. Pour illustrer les informations dont disposent les joueurs dans cette situation, il est important de comprendre le concept d'ensemble d'informations au sein de l'arbre de jeu. Ces ensembles reflètent la connaissance d'un joueur au moment de prendre une décision [29].

### 2.3.3 Jeu à somme nulle :

On dit qu'un jeu deux joueurs est à somme nulle si le montant total des gains à la fin de la partie est nul, en d'autre terme si le montant total gagné par un joueur est égal au montant perdu par l'autre. Dans ce cas, ce qu'un joueur gagné équivaut aux pertes subies par les autres joueurs. Les jeux à somme nulles, également désignés comme des jeux purement compétitifs, se caractérisent par des préférences opposées entre les joueurs. Il est rare que les jeux dans le domaine des télécommunications soient de nature à somme nulle. Néanmoins, si l'on étudie un cas simplifié, tel qu'une allocation de bande passante sur une liaison unidirectionnelle, le jeu peut se réduire à un jeu à somme nulle [30].

### 2.3.4 Jeu simultans et jeu séquentiel :

La classification des modèles peut également s'effectuer en fonction du déroulement du jeu. Un jeu simultané (ou stratégique) simule une situation dans laquelle chaque participant décide de l'ensemble de son plan d'action au début du jeu. Ainsi, toutes les décisions des joueurs sont prises simultanément, et chaque joueur prend ses décisions sans tenir compte des choix des autres. En revanche, un jeu séquentiel décrit le déroulement spécifique du jeu, où chaque participant analyse son plan d'action à chaque étape de la partie lorsqu'il doit prendre une décision. Les jeux simultanés sont souvent représentés sous forme de tableau (forme normale du jeu), ce qui est particulièrement utile lorsque les stratégies des joueurs sont discrètes. Le duopole de Cournot en est un exemple. Les jeux séquentiels, quant à eux, sont couramment illustrés à l'aide d'un arbre de jeu. Cette représentation permet de décrire en détail la structure et la progression du jeu. Cependant, comme nous le verrons plus tard, cette distinction peut parfois être moins précise, et différentes formes de représentation peuvent être utilisées pour décrire divers types de jeux [31].

### 2.3.5 Jeux sous forme normale ou sous forme extensive :

a **Jeu sous forme normale (stratigique) :** Le modèle de jeux sous forme stratégique transcende la nature séquentielle de la prise de décision. Lorsqu'il est appliqué à des contextes où les acteurs prennent des décisions de manière séquentielle, il nécessite l'hypothèse que les joueurs choisissent leur stratégie

de manière définitive, s'engageant ainsi à la suivre sans possibilité de la modifier au fil du jeu. Cette approche s'avère particulièrement pertinente pour décrire des situations où les joueurs prennent leurs décisions simultanément.

**Définition 2.3.5.1 (Jeu sous forme normale à N joueurs)**

Un jeu sous forme normale est décrit par le jeu le

$$\langle I, (S_i)_{i \in I}, (u_i)_{i \in I} \rangle \tag{2.2}$$

Où

I est l'ensemble des joueurs.

$S_i$  est l'ensemble des stratégies du joueur  $i$ ,  $i \in I$ .

$u_i$  est la fonction de gain du joueur  $i$ ,  $i \in I$ .

**Exemple 1. (Le dilemme du prisonnier)** Deux suspects d'un crime majeur sont détenus dans des cellules séparées. La police a assez de preuves pour condamner chacun d'entre eux pour des crimes mineurs mais pas assez pour les condamner pour le crime majeur, à moins que l'un d'entre eux ne dénonce l'autre. Si les deux suspects se taisent, ils seront chacun condamnés à un an de prison. Si seulement l'un d'entre eux dénonce l'autre, il sera libéré et utilisé en tant que témoin contre l'autre qui écoperera de 10 ans de prison. Enfin si les deux dénoncent, ils passeront chacun 5 ans en prison.

Ce jeu peut être représenté comme un jeu stratégique où :

- les joueurs sont les deux suspects.
- Chacun de deux suspect a le choix entre deux actions : S : Se taire , D : Dénoncer.
- On suppose que les préférences des joueurs sont uniquement déterminées par les années qu'ils passeront en prison. Ainsi :

$$u_1(D, S) > u_1(S, S) > u_1(D, D) > u_1(S, D)$$

$$\text{et } u_2(S, D) > u_2(S, S) > u_2(D, D) > u_2(D, S)$$

Par exemple, on peut spécifier :

$$u_1(D, S) = 0, u_1(S, S) = -1, u_1(D, D) = -5, u_1(S, D) = -10.$$

Et de manière similaire

$$u_2(S, D) = 0, u_2(S, S) = -1, u_2(D, D) = -5, u_2(D, S) = -10$$

Il est usuel de représenter un jeu fini à deux joueur sous forme stratégique par le tableau des gains. Le jeu peut alors être représenté comme suit :

	Suspect 2	
Suspect 1	Se taire	Dénoncé
Se taire	(-1 ; -1)	(-10 ; 0)
Dénoncé	(0 ; -10)	(-5 ; -5)

FIGURE 2.1 – Dilemme du prisonnier

**b Sous forme extensive :**

La forme normale des jeux fournit une manière adéquate de représenter des joueurs effectuant des choix de stratégies simultanément. Dans cette approche, aucun joueur ne possède d'information sur les stratégies choisies par les autres lorsqu'il prend sa décision. Dans de nombreux scénarios concrets, les décisions des joueurs sont prises en considérant une situation observée qui est influencée par les choix antérieurs des autres joueurs. Par exemple, cela se produit lors d'enchères ascendantes, de négociations ou de parties d'échecs.

**Remarque 2.** La représentation par la forme extensive est généralement utilisée pour les jeux séquentiels car l'ordre des coups est clairement décrit.

Représentation graphique qui semble la plus appropriée consiste à tracer un arbre (appelé arbre de Kuhn) graphe connexe sans cycle :

- à chaque nœud terminal correspond un résultat du jeu
- à chaque nœud non terminal est associé un joueur : arrivé à ce point du jeu, c'est à son tour de jouer,
- Chaque arc représente chacune des actions que ce joueur peut prendre à ce point du jeu

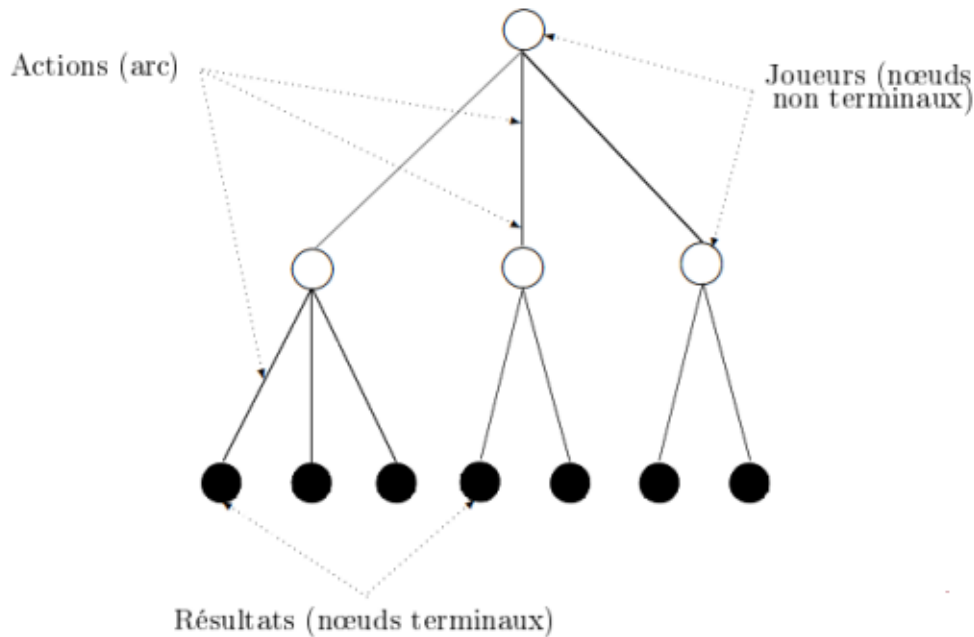


FIGURE 2.2 – Le présentation d'un jeu par un arbre

**Exemple 2.** Soit un jeu à deux joueurs, dans lequel chaque joueurs a deux actions possibles : aller à droite ou aller à gauche. Le joueur 1 joue en premier. Chaque joueur préfère être à droite si l'autre y est aussi, sinon il préfère être à gauche.

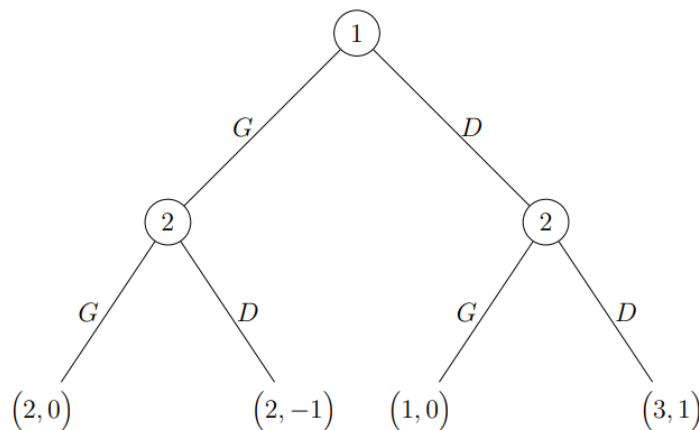


FIGURE 2.3 – Jeu séquentiel

## 2.4 Concepts de solution

L'analyse d'un jeu vise à anticiper l'équilibre qui surgira si les participants agissent de manière rationnelle. Un équilibre, dans ce contexte, représente une combinaison de stratégies où aucun joueur n'a de motivation à changer sa tactique en considérant celles des autres. Une fois qu'un équilibre est établi dans un jeu, il ne présente aucune incitation au changement, peu importe comment il a été atteint. Idéalement, nous rechercherions un équilibre unique qui permettrait de prédire précisément la résolution du conflit.

Toutefois, il est fréquent de rencontrer plusieurs équilibres, voire de situations où aucun équilibre n'existe. Dans cette section, nous écrivons quelques concepts de solution et un concepts les plus fondamentaux a savoir : l'équilibre de Nash.

### 2.4.1 Équilibre en stratégies dominantes

**Définition 1.4.1.1 (Dominance) [26] :**

On dit que la stratégie  $s_i^1$  du joueur  $i$  domine la stratégie  $s_i^2$  si

$$u_i(s_i^1, s_{-i}) \geq u_i(s_i^2, s_{-i}), \forall s_{-i} \in S_{-i}. \quad (2.3)$$

**Définition 1.4.1.2 (Dominance stricte) :**

On dit que la stratégie  $s_i^1$  du joueur  $i$  domine strictement la stratégie  $s_i^2$  si

$$u_i(s_i^1, s_{-i}) > u_i(s_i^2, s_{-i}), \forall s_{-i} \in S_{-i}. \quad (2.4)$$

**Définition 1.4.1.3 ( Stratégie Dominante ) :**

On dit que la stratégie  $s_i^*$  est une stratégie dominante pour le joueur  $i$  si elle domine tout stratégies  $s_i \in S_i$ . **Définition 1.4.1.4 :** Une stratégie dominée  $s_i$  procure au joueur des gains toujours inférieur à ceux associés à au moins une autre des stratégies possibles. On distingue deux types :

Une stratégie  $s_i$  est **strictement dominée** pour le joueur  $i$  s'il existe une stratégie  $s_i'$  telle que pour tous les profils  $S_{-i}$

$$u_i(s_i', s_{-i}) > u_i(s_i, s_{-i}) \quad (2.5)$$

Une stratégie  $s_i$  est **faiblement dominée** pour le joueur  $i$  s'il existe une stratégie  $s_i'$  telle que pour tous les profils  $S_{-i}$

$$u_i(s_i', s_{-i}) \geq u_i(s_i, s_{-i}) \quad (2.6)$$

**Définition 1.4.1.5 :**

Un jeu possède un équilibre en stratégies (strictement) dominantes si pour chacun des joueurs, il existe une stratégie qui domine (strictement) toutes ses autres stratégies, quelles que soient les stratégies des autres joueurs. Autrement dit, quelles que soient les stratégies des autres joueurs, le gain que j'obtiens en jouant cette stratégie dominante (strictement) sera strictement supérieur à celui obtenu en jouant une autre stratégie. Chaque joueur jouera donc évidemment sa stratégie dominante et personne n'aura intérêt à dévier de cet équilibre.

**Définition 1.4.1.6 (Équilibre par élimination itérée des stratégies dominées) :**

On dit qu'une stratégie est dominée pour un joueur donné s'il existe au moins une autre stratégie telle que, quelles que soient les stratégies adoptées par les autres joueurs, cette autre stratégie est toujours au moins aussi bonne que la première et strictement meilleure dans au moins l'une des situations. Si chaque joueur est rationnel, suppose que les autres joueurs sont rationnels et suppose que les autres joueurs supposent qu'il est rationnel, alors on peut définir l'équilibre du jeu comme celui qui serait obtenu par l'élimination successive des stratégies dites dominées. L'idée est que chaque joueur peut identifier les stratégies dominées de son adversaire et peut donc réduire le champ des actions, sachant qu'elles ne seront jamais jouées par un joueur rationnel.

### 2.4.2 Équilibre de Nash

L'équilibre de Nash, développé par John Nash, il est basé sur le principe de la rationalité individuelle. Il s'agit d'un profil de stratégies où aucun joueur n'a intérêt à modifier son comportement compte tenu des stratégies de ses adversaires, et ce de manière à ce qu'aucun joueur ne puisse obtenir un gain supplémentaire

en modifiant unilatéralement sa stratégie. Dans l'équilibre de Nash, chaque joueur n'est pas nécessairement satisfait des stratégies choisies par les autres, mais sa propre stratégie constitue la meilleure réponse à leurs actions. Les joueurs dans un équilibre de Nash demeurent toujours non coopératifs.

**Définition 2.4.2.7** [31] Un profil de stratégies  $s^* = (s_1^*, \dots, s_n^*)$  est un équilibre de Nash en stratégies pures dans le jeu (2,2) si aucun joueur n'a intérêt à changer sa stratégie  $s_i$  au moment où les autres joueurs continuent à jouer la stratégie  $s_i^*$ , c'est à dire :

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*), \forall s_i \in S_i, \forall i \in I \quad (2.7)$$

**Définition 2.4.2.8** Un profil de stratégies  $s^* = (s_1^*, \dots, s_n^*)$  est un équilibre de Nash strict dans le jeu (2.2) ssi :

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) > u_i(s_i, s_{-i}^*), \forall s_i \in S_i, \forall i \in I \quad (2.8)$$

## 2.5 Quelques champs d'applications de la théorie des jeux dans le domaine informatique

La théorie des jeux trouve de nombreuses applications en informatique, notamment dans la modélisation de systèmes multi-agents, la création d'algorithmes pour résoudre des problèmes complexes, et même dans des domaines interdisciplinaires tels que la biologie. Dans les télécommunications, en particulier dans les réseaux sans fils, la théorie des jeux est un outil puissant pour modéliser des situations complexes, optimiser les performances et gérer les ressources limitées. Elle permet de résoudre des problèmes tels que la gestion de la bande passante, la réduction de la congestion, la sécurité, le routage, la gestion de l'énergie et le contrôle d'accès au support de transmission. Elle est particulièrement utile dans les environnements de réseaux sans fils de grande envergure et complexes, offrant des solutions évolutives et résilientes. Certaines de ces applications sont répertoriées ci-dessous :

- **Le jeu de contrôle de puissance** [32] : Le jeu de contrôle de puissance se positionne au cœur de cette problématique. Dans les réseaux cellulaires, il est coutume que la puissance de transmission optimale soit fixée par la station de base (ou le point d'accès réseau), puis diffusée à tous les utilisateurs mobiles par l'entremise de messages de contrôle. Cela constitue le défi du contrôle centralisé de l'alimentation. Cependant, les réseaux ad hoc opèrent dans un environnement décentralisé, dépourvu de station de base. Chaque appareil mobile agit alors en tant que station de base autonome, prenant la responsabilité de déterminer sa puissance d'émission optimale. Ce procédé est connu sous le nom de contrôle de puissance distribuée. Contrairement aux réseaux dotés d'une infrastructure, les réseaux ad hoc se servent d'algorithmes pour gérer la puissance. Le choix d'un algorithme distribué pour un réseau demande la prise en considération de multiples variables, incluant les performances à l'état stable, la convergence, la complexité, la stabilité et l'interaction avec les autres couches. Ces questions figurent parmi les enjeux majeurs du domaine du contrôle de puissance distribuée et de la théorie des jeux à l'heure actuelle.
- **Le jeu de l'adaptation de la forme d'onde** [33] : La modification de la forme d'onde au sein des réseaux ad hoc implique le processus par lequel un nœud choisit une forme d'onde dans le but de réduire les interférences au niveau du récepteur. Les interférences au niveau du récepteur sont déterminées par la corrélation entre la forme d'onde du nœud mobile et celles d'autres nœuds mobiles dans le réseau. Dans cette optique, la problématique est abordée sous forme de jeu. Cependant, il est important de noter que de nombreux nœuds impliqués dans la transmission manquent souvent d'une connaissance exhaustive de l'environnement d'interférences au niveau du récepteur
- **Le jeu de partage du spectre radio** [32] : Le défi du partage du spectre radio consiste à attribuer équitablement le spectre limité aux appareils sans fil, une tâche délicate, cette problématique à étudier par Christin et Ai[56] et modélise par un jeu coopératif. Le spectre disponible est divisé de manière uniforme entre divers canaux grâce à cette approche. Chaque nœud a la capacité de transmettre sur plusieurs canaux simultanément, et chaque canal peut être accompagné de sa propre puissance de

transmission

- **Communication coopérative** : L'exploration des scénarios collaboratifs dans les réseaux sans fil a récemment suscité un regain d'intérêt. Il a été démontré que la coopération au sein de ces réseaux peut considérablement améliorer leurs performances. En conséquence, la communication coopérative est en passe de devenir une technologie fondamentale dans les nouvelles générations de réseaux sans fil, et elle a déjà été intégrée à plusieurs normes, notamment la famille de normes IEEE 802.16 (WiMax) pour les réseaux à large bande. Toutefois, l'introduction de la communication coopérative dans les réseaux sans fil fait face à divers défis (élaboration de stratégies coopératives autonomes et distribuées, analyse des interactions entre les utilisateurs, etc.) qui nécessitent des méthodes d'analyse robustes et rigoureuses, telles que la théorie des jeux, pour être résolus efficacement.

## 2.6 Conclusion

La théorie des jeux est une discipline mathématique qui s'intéresse à l'analyse de situations où les participants sont en interdépendance stratégique. Son objectif est de modéliser ces interactions de manière formelle pour guider les joueurs dans le choix optimal de leurs stratégies. Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux de la théorie des jeux ainsi que les différentes catégories de jeux qui peuvent se présenter en fonction du contexte. L'importance de l'équilibre a été abordée, car il est central dans l'application de la théorie des jeux. Son existence dans un modèle permet d'apporter des solutions aux conflits potentiels et de conduire le système vers un état d'équilibre, garantissant ainsi une stabilité durable. Tout au long du chapitre, nous avons proposé quelques exemples simples et explicites pour renforcer la compréhension des concepts clés de la théorie des jeux et faciliter l'assimilation du principe et de l'application de cette théorie et nous avons aussi exposé quelques applications de la théorie des jeux dans le domaine informatique notamment dans les RCSFs.



## Chapitre 3

# *Application de la théorie des jeux dans les réseaux de capteurs sans fils*

### 3.1 Introduction

prolonger la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) représente un défi fondamental dans la conception de ces réseaux, en raison de leur alimentation limitée et non remplaçable. Dans la suite de cette mémoire, nous visons à travailler sur des réseaux de capteurs sans fil. Dans de tels cas, le protocole AODV n'est plus efficace en termes de consommation d'énergie car il demande la mise à jour des tables de routage, ce qui nécessite des ressources énergétiques importantes. Plusieurs travaux existent dans la littérature afin de résoudre les problèmes évoqués ci-dessus. En général, ils consistent à diminuer la puissance de transmission des capteurs et à réduire leur portée. Ces stratégies permettent de simplifier le routage, de diminuer les interférences, et de réduire la consommation d'énergie, mais ils maintiennent la topologie à plat qui n'est pas adaptée au RCSF. La solution retenue le plus communément pour organiser un RCSF de grande dimension est de regrouper les nœuds capteurs géographiquement proches en clusters (Figure 3.1). Cette technique réduit le trafic de contrôle et simplifie le processus d'aiguillage de données ce qui facilite le fonctionnement du protocole de routage. Les algorithmes de clustering sont conçus pour satisfaire des objectifs fixés selon le contexte dans lequel cette technique est déployée. Dans ce chapitre, nous présentons une étude des algorithmes de clusterisation et nous détaillons également quelques techniques de clusterisation qui existent dans la littérature et leur apport énergétique. Dans cette optique, l'exploration d'une version améliorée du protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarch) est entreprise, visant à optimiser la gestion des nœuds capteurs au sein de clusters. Cette amélioration repose sur des concepts de la théorie de jeux pour une sélection équitable des "cluster-heads" tout en minimisant la consommation énergétique lors de sélection et des transmissions. Ce protocole standard est considéré parmi les plus performants en termes d'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils (RCSFs). Finalement, nous clôturons ce chapitre par une discussion des résultats obtenus.

### 3.2 Etat de l'art

#### 3.2.1 Principes du clustering

La clusterisation représente une solution prometteuse pour les réseaux "auto-organisables" à grand nombre de nœuds [34]. Cette technique vise à rassembler les nœuds du réseau dans des groupes virtuels appelés "clusters". Le regroupement des nœuds voisins dans un même cluster suit certaines règles. Chaque cluster est identifié par un chef ou leader, appelé chef de cluster ou cluster-head (CH). Le rôle de ce dernier est de gérer les activités de son groupe, tels que le routage des données, leur agrégation, la coordination et la synchronisation entre les nœuds membres. Ces derniers sont des nœuds ordinaires et peuvent basculer entre état actif ou état endormi, selon les événements à détecter, afin de prolonger la durée de vie de leur

batterie. Ainsi, après avoir accompli leur tâche (détection d'un événement, transmission de leurs propres données au CH auquel ils sont associés, acheminement des données des nœuds voisins, etc), les nœuds actifs transitent à l'état de sommeil. Les CHs se chargent ensuite de la structure du niveau hiérarchique supérieur en relayant ces données à la station de base.

### 3.2.2 Topologie en clusters

Dans cette partie, nous allons passer en revue le principe de la construction des clusters, la maintenance de ces clusters, les avantages et les inconvénients de ces techniques

#### Construction

Plusieurs techniques de clustering ont été proposées dans la littérature. Ces dernières peuvent varier selon la métrique d'élection des cluster-heads, la taille des clusters, le mode de déploiement des capteurs (aléatoire ou déterministe), etc. Le processus de construction d'une topologie auto-organisée en clusters est illustré sur la figure (3.1). Après la phase de découverte de voisinage (Figure 3.1.b), le réseau commence à s'organiser en groupes de nœuds (Figure 3.1.d). L'ensemble des CHs peut former une dorsale virtuelle pour le routage inter-clusters (Figure 3.1.c). Chronologiquement, les phases c et d peuvent avoir lieu en même temps.

Un algorithme de clustering basique peut être résumé comme suit :

- Comme la plupart des algorithmes de routage, chaque nœud découvre son voisinage à l'aide des messages "HELLO" qu'il diffuse à son voisinage. De cette façon, il peut calculer sa métrique (Figure 3.1.b).
- Si les CHs ne sont pas désignés à l'avance, le nœud capteur détermine s'il est chef du cluster ou pas en fonction de la métrique de découverte de son voisinage (Figure 3.1.c)
- Après avoir été élu comme CH, ce dernier diffuse son statut à son voisinage pour former un cluster ; il invite les nœuds du voisinage à le rejoindre (Figure 3.1.d).
- Toute modification de statut doit être notifiée par un message diffusé à tous les voisins.

Selon la stratégie adoptée, la formation des clusters peut être caractérisée par la taille et le type des clusters (homogènes, hétérogènes, recouvrant ou pas, actifs ou passifs, etc). Les clusters sont dits recouvrant si un nœud peut appartenir à plusieurs clusters en même temps. Dans ce cas, ces nœuds jouent le rôle de passerelles dans le réseau (Figure 3.2). La figure (3.1) illustre le cas contraire des clusters non recouvrant où un nœud n'est associé qu'à un seul groupe. Il est aussi important de tenir compte du nombre de sauts qui sépare un nœud membre et le CH auquel il est rattaché et qui peut être à un seul saut, comme il peut être à plusieurs sauts.

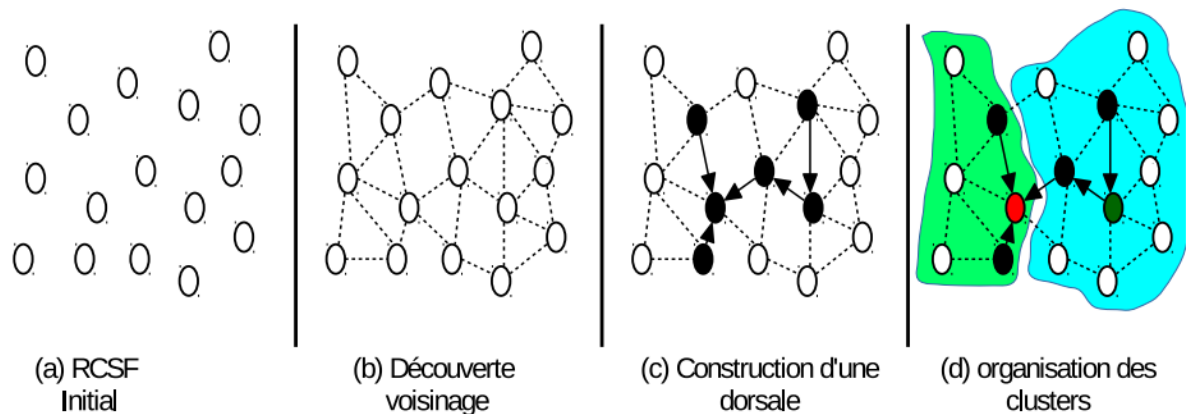


FIGURE 3.1 – Etapes d'organisation d'une topologie en clusters

### Maintenance

En tenant compte de la mobilité des nœuds et des incidents qu'ils peuvent subir ou des erreurs de communication telles que les interférences, les collisions, les évanouissements du canal et l'épuisement des batteries des nœuds, il est crucial d'adopter une politique de maintenance qui permet de préserver la stabilité de la topologie au fil du temps et d'éviter la reconstruction périodique de toute la structure du réseau. Par ailleurs, la maintenance s'avère importante dans des clusters recouvrants (des nœuds peuvent être membres de plusieurs clusters) ou la ré-affiliation d'un nœud mobile d'un cluster à un autre provoque la restructuration des clusters concernés et, dans certains cas, la restructuration de tout le réseau, ce qui engendre une charge énergétique supplémentaire non négligeable. Pour faire face à ce problème, des

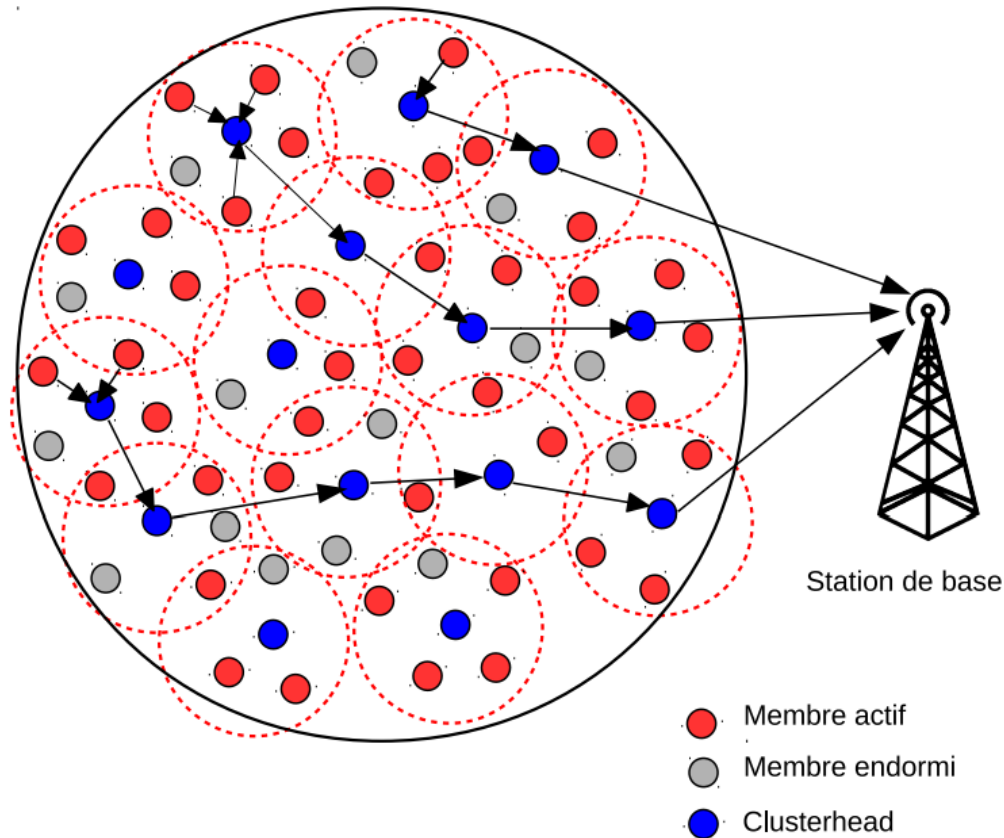


FIGURE 3.2 – Exemple de topologie basée sur des clusters

algorithmes de clustering ont été proposés. Ils permettent la création de clusters non recouvrants, ce qui signifie que chaque nœud appartient à un seul cluster. De cette manière, l'opération de maintenance peut être limitée au niveau d'un seul cluster lors de la ré-attribution d'un nœud à un autre cluster. Afin d'optimiser davantage la constance des clusters et minimiser les reconstructions de la structure virtuelle, certaines études proposent de garder le statut du CH déjà élu pour une grande période même s'il ne possède pas le score le plus élevé dans son cluster. D'autres études proposent d'adapter la fréquence du changement de la structure : réserver l'énergie résiduelle surtout si le service est accompli. D'autres travaux proposent d'alterner rôle le du chef de cluster pour équilibrer la consommation d'énergie entre l'ensemble des nœuds. Afin de minimiser la maintenance, des travaux de recherche ont proposé d'initier la formation des clusters pour chaque diffusion des données par un nœud. Il est primordial d'identifier l'ensemble des nœuds participant à l'acheminement de l'information, au fur et à mesure qu'elle se propage dans le réseau. Ce mécanisme n'est pas adapté au réseau dense car le nombre de messages de diffusion et le temps de latence pour la phase de découverte des routes peuvent s'avérer importants.

### Avantages et inconvénients

La technique de clustering possède plusieurs avantages. En effet, l'organisation du réseau en clusters permet la réutilisation des ressources du réseau. Les auteurs dans [35] proposent que les clusters non voisins puissent utiliser la même fréquence ou le même jeu de code. En plus, les nœuds de chaque cluster sont supervisés par leur CH qui peut gérer l'accès au canal de transmission, économisant par la suite les ressources gaspillées dans la retransmission causée par les collisions. Nous citons aussi le gain du clustering au niveau routage. Ainsi, les CHs et les passerelles peuvent former une dorsale virtuelle pour le routage intercluster. Par conséquent, la diffusion et la génération des données de routage peuvent se limiter à cet ensemble de nœuds [36], ceci élimine les diffusions fréquentes des messages de routage pouvant surcharger le réseau et rabaisser ses performances. En outre, la structure du cluster permet de faire apparaître le réseau plus petit et plus stable pour chaque nœud du réseau. Dans ce cas, si un nœud mobile transite d'un cluster à un autre, seuls les nœuds appartenant au cluster du départ mettront à jour leurs informations [37]. Par conséquent, les changements locaux n'affectent pas le réseau entier mais plutôt la partie concernée uniquement. Ainsi, les données stockées et traitées par chaque nœud seront réduites. La clusterisation a l'avantage d'être une alternative attrayante pour atténuer les problèmes de passage à l'échelle. Néanmoins, cette stratégie d'organisation du réseau possède des inconvénients. En effet, construire et maintenir une structure de clusters demande un coût supplémentaire comparé à un réseau plat. L'analyse du coût de la clusterisation permet d'évaluer son efficacité et son passage à l'échelle. Cette analyse peut être quantitative ou qualitative. D'après les travaux de [38], nous mettons l'accent sur trois coûts de la clusterisation :

- Dans certaines propositions de clusterisation, l'effet cascade de la re-clusterisation peut dégrader énormément les performances des couches supérieures. Cet effet vise à reconstruire la totalité de la topologie des clusters sur le réseau entier au cas où un événement local se déclenche (batterie épuisée d'un nœud, mouvement, etc) ce qui nécessite la ré-élection de nouveau d'un CH [39]. Cette opération peut être mise en relief quand le changement du chef de cluster dépend d'autres groupes. Ceci mène à l'élection de nouveau des CHs dans tout le réseau [39].
- La diffusion périodique des messages de contrôle, pour assurer la maintenance de l'organisation du réseau, impose une charge supplémentaire à ce dernier. En effet, pour un réseau large et dense, en augmentant le nombre des nœuds le trafic de contrôle augmente. Ceci nécessite donc un temps de traitement supplémentaire et un gaspillage d'énergie en faveur des ressources limitées des RCSF.
- L'étape d'organisation de la topologie du réseau est une étape de décision du statut de chaque nœud et de son rôle. Avec des mécanismes de clusterisation basés sur les décisions diffusées des voisins, le temps d'attente estimé peut être très long et embarrassant dans un réseau dense et large. Par conséquent, la phase de formation des clusters ne peut pas être limitée dans le temps surtout dans un réseau à grande envergure qui dépend de plusieurs paramètres (nombre des nœuds, canal de transmission)

### Métriques d'évaluation des performances des algorithmes de clusterisation

Nombreux sont les algorithmes de clusterisation proposés dans la littérature. Pour évaluer leurs performances, il faut utiliser des métriques précises et bien ciblées. En se basant sur les travaux de [40], nous avons opté pour les métriques suivantes :

- Caractéristiques des clusters :
  - Le nombre moyen de clusters : le nombre moyen de clusters existant dans le réseau.
  - Taille moyenne d'un cluster : le nombre moyen de nœuds membres gérés par un chef du cluster.
  - Distance totale aux CHs : la somme des distances entre les cluster-heads et leurs nœuds membres.
- Echange de messages pour le processus de clusterisation :
  - Overhead : l'overhead durant le temps d'opération du réseau.
  - Complexité en messages pour le changement de la structure du réseau : le nombre de messages échan-

gés entre les nœuds pour faire la ré-organisation des groupes après avoir changé la topologie du réseau.

- Stabilité de la structure des clusters :
  - Durée moyenne de vie d'un nœud ordinaire : la durée moyenne pendant laquelle un nœud est affilié à son cluster-head.
  - Durée moyenne de vie d'un cluster-head : la durée moyenne pendant laquelle un nœud : est élu comme cluster-head.
  - Nombre de changements de cluster-head : le nombre de fois qu'un chef de cluster change de statut.
  - Nombre de mises à jour de l'ensemble dominant : l'ensemble des CHs représente l'ensemble dominant si tous les nœuds dans le réseau appartiennent à l'ensemble des clusters associés à ces nœuds.
  - Nombre de ré-affiliations : le compteur de ré-affiliations est incrémenté quand un nœud est dissocié de son cluster-head et se rattache comme membre à un autre cluster-head à l'intérieur de l'ensemble dominant courant.
- Facteur d'équilibre de charge :
  - Durée moyenne de vie d'un cluster-head : la durée moyenne pendant laquelle un nœud joue le rôle de chef de cluster.
  - Variance de la durée de vie d'un cluster-head : la variance de la durée pendant laquelle un nœud est cluster-head.
- Complexité des algorithmes : Complexité en termes de variation de la topologie. Elle mesure le temps nécessaire pour accomplir une ré-organisation des clusters après le changement de la topologie du réseau

### 3.2.3 Approches de clustering

Nous dressons dans cette section, un état de l'art passant en revue les principales techniques de clusterisation proposées dans la littérature. Le routage hiérarchique permet de maintenir efficacement la consommation d'énergie des nœuds capteurs en effectuant l'agrégation et la fusion des données pour diminuer le nombre de paquets de données transmis à la destination. et en autorisant la communication multi-hops au sein d'un cluster ou entre clusters en cas des réseaux à grandes dimensions. La formation de clusters est généralement basée sur la réserve d'énergie des capteurs. Comme nous l'avons décrit dans la section précédente, il existe plusieurs stratégies de classification des algorithmes de clustering : selon le déploiement des nœuds homogènes ou hétérogènes, selon la communication qui peut être à un ou à  $K$  sauts du CH, selon les critères qui permettent de déterminer les CHs, selon le nombre de sauts qui séparent un nœud ordinaire du cluster-head auquel il est rattaché, selon la politique de maintenance de la structure, etc. Néanmoins, nous pouvons trouver des algorithmes qui n'adoptent aucune stratégie pour organiser le réseau en groupes, c'est plutôt la nature même du nœud qui lui permet d'être chef du cluster. Dans cette section, nous visons à analyser les approches de clustering proposées dans la littérature pour les RCSF en mettant l'accent aussi bien sur leurs avantages que sur leurs limitations. Pour cette étude, nous avons choisi de les classer suivant le processus d'élection du CH. Ainsi, il s'agit de voir si, lors de l'élection de ce dernier, son énergie résiduelle a été prise en compte ou pas.

#### Métriques d'élection des CHs

La phase d'élection du CH est la phase la plus importante dans la conception d'une topologie en clusters. Ce processus s'implémente généralement de la façon suivante :

- Si un nœud  $n$  possède la meilleure métrique dans son voisinage, il se déclare chef du cluster et diffuse son statut à ses voisins pour les inviter à être membre dans son cluster .
- Sinon il attend les messages diffusés par ses voisins.

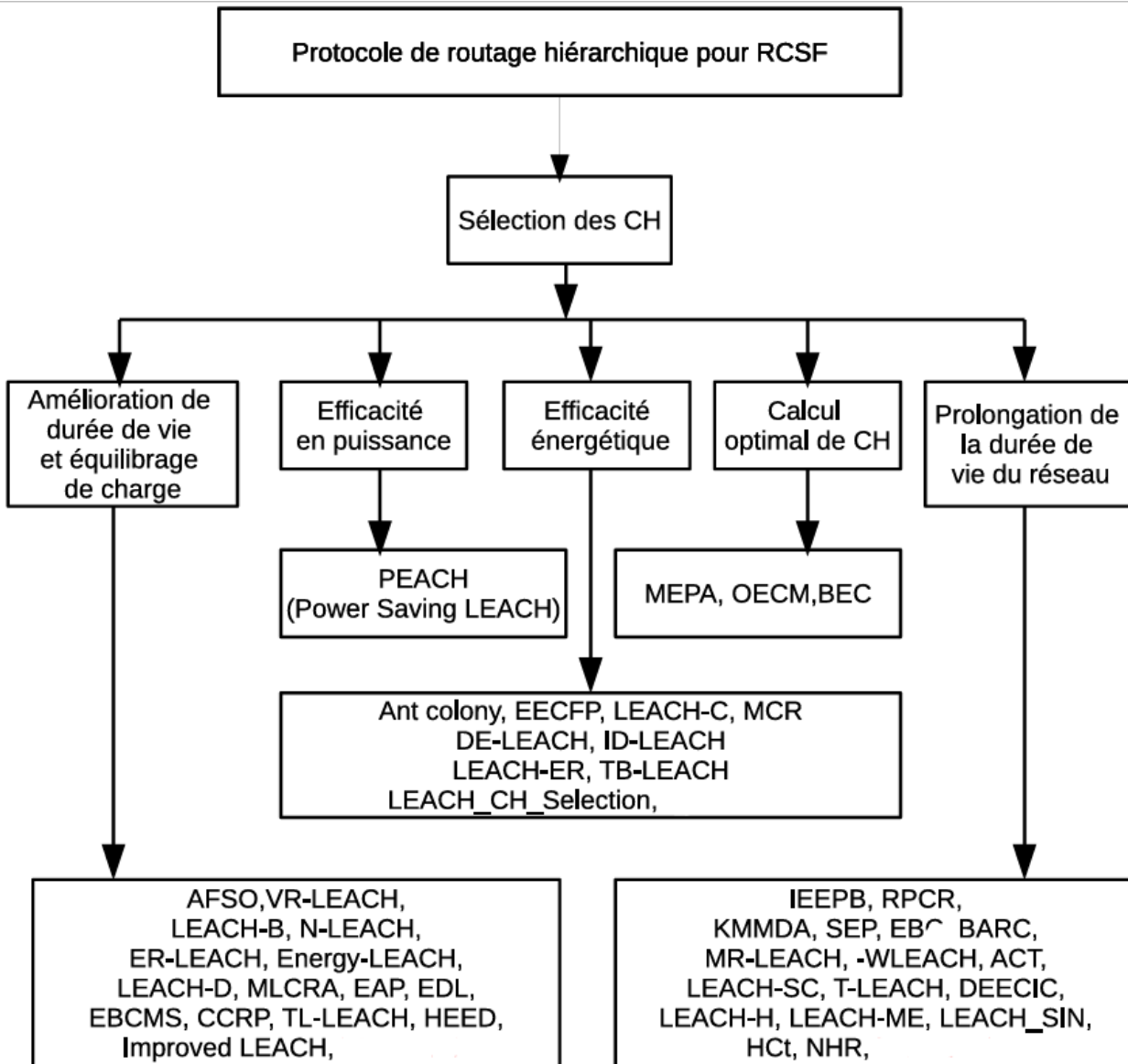


FIGURE 3.3 – Catégorisation suivant le processus d'élection des cluster-heads

- Si plusieurs voisins se déclarent comme CHs, le nœud  $n$  va jouer le rôle de passerelle et diffuse son statut à ses voisins.
- Si un seul voisin se déclare comme CH, le nœud  $n$  le rejoint dans son cluster et diffuse son statut à ses voisins.
- Sinon, le nœud  $n$  va lui même jouer le rôle de chef de cluster et diffuse son statut à ses voisins.

#### A Algorithmes basés sur l'énergie résiduelle

Plusieurs techniques de clustering ont été proposées afin d'optimiser la consommation d'énergie dans les RCSF. **LEACH** [16] est l'un des protocoles les plus populaires qui n'autorise que la communication à un seul saut (Figure 3.4). Le fonctionnement de cet algorithme est décrit dans le chapitre 1. Plusieurs travaux de recherches sont fondés sur **LEACH** et qu'on appelle < descendants de **LEACH** > (Tableau 1.1). Ces protocoles ont été proposés afin de pallier aux problèmes de la version originale. **HEED** [18] est un algorithme hiérarchique distribué basé sur **LEACH** où les CHs sont choisis en tenant compte de l'énergie résiduelle des nœuds capteurs. Ainsi, les nœuds ayant des réserves énergétiques importantes sont élus comme chefs de clusters. Ce protocole construit un graphe connecté de CHs multi-sauts. Les clusters formés selon **HEED** sont disjoints. Ainsi, ce protocole invoque une autre métrique pour traiter le cas où un nœud se trouve à proximité de deux CHs se trouvant dans le même rayon. Cette métrique

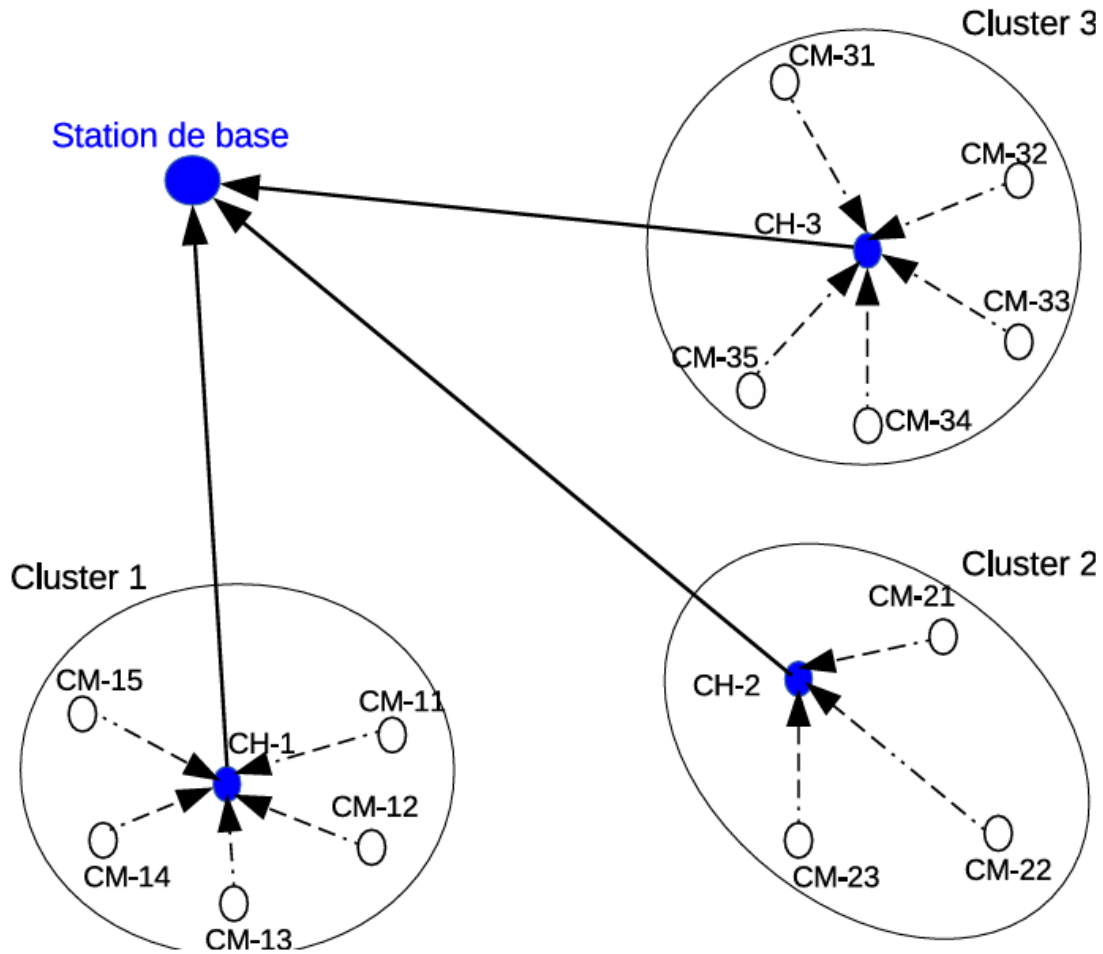


FIGURE 3.4 – Communication en cluster pour LEACH

est une métrique de coût de communication qui peut être fonction de la proximité des voisins ou de la densité du cluster. Le processus d'élection des CHs suit une loi probabiliste avec itérations. Pour chaque nœud  $i$ , le seuil d'éligibilité à la première itération est fixé à :

$$CH_{prob} = \max\left(C_{prob} \frac{E_i}{E_{max}}, P_{min}\right) \quad (3.1)$$

où  $C_{prob}$  est le ratio recherché de cluster-heads dans le réseau,  $p_{min}$  une probabilité minimale d'éligibilité pour assurer la terminaison de l'algorithme et  $E_i$  l'énergie résiduelle du nœud  $i$ . Le protocole **HEED** vise à uniformiser la distribution des cluster-heads dans le réseau pour générer des clusters équilibrés en taille et équilibrer la consommation d'énergie. Cet algorithme est plus adapté au RCSF avec des nœuds hétérogènes.

**EEHC (Energy Efficient Heterogeneous Clustered)** [41] est un algorithme de routage hiérarchique basé sur **LEACH**. Pour ce protocole, la sélection du CH est aussi probabiliste et elle est fondée sur l'énergie résiduelle des nœuds. Ce protocole permet considérablement d'uniformiser la consommation d'énergie et de prolonger la durée de vie du réseau.

**EAP (Energy Aware Routing Protocol)** est un algorithme de routage qui vise à maximiser la durée de vie des RCSF [42]. Les auteurs cherchent à équilibrer la consommation d'énergie entre les

nœuds du réseau en fonction des besoins de l'application. Ainsi, chaque nœud capteur maintient une table de voisinage qui contient l'identifiant ID et l'état et l'énergie résiduelle des nœuds voisins. Ce protocole introduit également un nouveau paramètre pour l'élection des CHs et le protocole peut ainsi gérer les capacités énergétiques hétérogènes des nœuds. Pour garantir l'efficacité énergétique dans les RCSF à grandes dimensions, les auteurs ont proposé dans [43] un protocole de routage, nommé **MCR (Multihop Communication Routing)**, qui fournit l'équilibrage de charge, la stabilité, l'amélioration de la durée de vie et l'efficacité énergétique pour les RCSF. **MCR** utilise le concept de communication à un et plusieurs sauts à la fois. Les CH sont sélectionnés sur la base de certaines probabilités pondérées. Les nœuds normaux communiquent avec le cluster-head en utilisant une communication à un seul saut, par contre le cluster-head communique avec la station de base en utilisant la communication multi-sauts. Les auteurs ont introduit le concept des nœuds avancés et super-avancés avec les nœuds normaux de sorte que le réseau résultant devienne un réseau hétérogène. Les nœuds avancés  $m$  sont les nœuds qui ont  $\alpha$  fois plus d'énergie que les nœuds normaux et  $m_0$  sont les nœuds qui ont  $\beta$  fois plus d'énergie que les nœuds normaux. Le reste des nœuds est traité comme des nœuds normaux. Soit  $E_0$  l'énergie résiduelle des nœuds. Les énergies des super nœuds et des nœuds avancés sont alors respectivement exprimées par  $E_0(1 + \beta)$  et  $E_0(1 + \alpha)$ .

L'énergie totale du réseau peut être décrite comme suit :

$$E = nE_0(1 + m(\alpha - m_0(\alpha - \beta))) \quad (3.2)$$

La probabilité pondérée des nœuds de devenir cluster-head peut être exprimée comme suit :

$$P_{normal} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m_0(\alpha - \beta))} \quad (3.3)$$

$$P_{avancee} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m_0(\alpha - \beta))}(1 + \alpha) \quad (3.4)$$

$$P_{superavancee} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m_0(\alpha - \beta))}(1 + \beta) \quad (3.5)$$

sachant que  $P_{opt}$  est la probabilité optimale d'élection du cluster-head. Elle est égale à l'énergie résiduelle de chaque nœud divisée par l'énergie initiale de ce nœud. En utilisant les équations ci-dessus, les auteurs ont dérivé une expression de seuil pour les nœuds normaux, avancés et super-avancés. Les autres phases de **MCR** sont la formation de clusters, la sélection de routes et la transmission de données.

## B Algorithmes ne tenant pas compte de l'énergie

**LCA (Linked Cluster Algorithm)** [44] est un algorithme de clusterisation très ancien. Chaque nœud est élu cluster-head ou non selon son identifiant et ceux de ses voisins. Un nœud peut être dans l'un des quatre états suivant : cluster-head, nœud ordinaire, membre ou passerelle. Au démarrage, l'ensemble des nœuds a un statut de nœud ordinaire. Le processus de formation de clusters est décrit ci-dessous :

- Chaque nœud  $i$  compare son identifiant avec celui de ses voisins à un saut. S'il constate qu'il a le plus petit identifiant, il se déclare comme chef de cluster et ses voisins à un saut le rejoignent.
- Au cas contraire, il attend la déclaration des voisins à un saut de leurs statuts. Si l'un d'eux se déclare comme cluster-head, le nœud  $i$  annonce son statut membre à son voisinage à un saut.
- Si un nœud a plus qu'un cluster-head dans son voisinage à un saut, il se déclare comme passerelle.

L'attribution des identifiants est arbitraire et ne change pas au fil du temps. Ainsi, les nœuds ayant un petit identifiant sont généralement élus pour jouer le rôle de cluster-heads pour une longue durée. Cet algorithme de plus petit identifiant ne tient pas compte de la contrainte d'énergie dans la sélection des cluster-heads. Par conséquent, des nœuds vont être plus sollicités pour ce rôle d'où l'épuisement rapide de leurs batteries et la création du problème des goulots d'étranglement. Pour remédier à ce problème, une variante de **LCA** appelé **Adaptive Clustering (AC)** est proposée dans [45]. En effet, **AC** utilise la notion de cluster-head uniquement pendant la phase de formation des clusters. Après l'organisation



du réseau en clusters, tous les nœuds auront le même statut. La métrique de sélection du cluster-head est la même que l'algorithme **LCA**. Vu que les chefs de cluster épuisent leurs énergies rapidement et l'apparition du problème des goulots d'étranglement dans **LCA**, le protocole **AC** est caractérisé par le non recouvrement des clusters.

**WCA (Weight Clustering Algorithm)** [46] est une version améliorée de **LCA**. La métrique de sélection de cluster-head dans **WCA** est basée sur la métrique du poids. Ce dernier est la somme pondérée de plusieurs métriques comme la distance euclidienne  $P(u)$ , la mobilité  $M(u)$ , le degré  $D(u)$  et le temps  $T(u)$  pendant le quel un nœud  $u$  joue le rôle du cluster-head. Le nœud ayant le plus faible poids dans son voisinage à un saut est élu comme chef de cluster. Le poids d'un nœud  $u$  est défini de la façon suivante :

$$Poids(u) = \alpha D(u) + \beta P(u) + \gamma M(u) + \delta T(u) \quad (3.6)$$

avec

$$\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1 \quad (3.7)$$

- $D(u)$  est la différence entre le degré du nœud  $u$  et le nombre de nœud qu'un cluster peut contenir.
- $M(u)$  est la mobilité relative moyenne du nœud  $u$  ;
- $P(u)$  est la somme des distances entre le nœud  $u$  et ses voisins. Elles sont calculées à travers le GPS.
- $T(u)$  est le temps de service en tant que cluster-head.

Pour la phase de maintenance, cet algorithme considère l'identifiant des nœuds uniquement. L'overhead induit par **WCA** est très important car les nœuds doivent calculer leurs poids avant la procédure de clustering. De plus, le calcul des distances, avec un système GPS, est gourmand en termes de consommation d'énergie.

## C Algorithmes sans métriques

Dans les réseaux hétérogènes, des nœuds de capacité plus élevée en termes de capacité de traitement du processeur, de bande passante, de puissance de transmission, etc... sont implémentés afin de jouer le rôle de cluster-head. Ces super-nœuds sont généralement intégrés pour améliorer les performances du réseau et répondre aux exigences des différentes applications. Dans [47], les auteurs ont montré que le déploiement d'un réseau hétérogène permet de gagner, par rapport à un réseau classique, cinq fois plus pour ce qui concerne la durée de vie du réseau et trois fois plus pour le taux de livraison de paquets, tout en améliorant la connectivité du réseau et en raccourcissant le temps de transmission. Cette stratégie facilite le passage à l'échelle du réseau. Pour ce qui concerne les métriques de formation des clusters dans les réseaux hétérogènes, elles se différencient selon l'objectif à atteindre en tenant compte de la contrainte d'énergie. L'algorithme de clustering proposé dans [48] permet d'équilibrer la charge des clusters en minimisant l'overhead. Dans cet article, les auteurs visent à améliorer la durée de vie du réseau et assurer la couverture des nœuds ordinaires. Pour cet algorithme, les super-nœuds ne jouent pas le rôle de cluster-head, mais plutôt des stations de collecte de données. En outre, les nœuds ordinaires sont sélectionnés pour devenir cluster-head selon la métrique ( Round Robin ) et de telle sorte que le graphe des chefs de cluster soit toujours connecté. La distance maximale entre les cluster-heads adjacents ne doit pas dépasser la portée radio des nœuds. Ceci augmente le nombre de clusters et par la suite le coût de communication entre clusters. Plusieurs techniques de clusterisations ont été proposées afin d'équilibrer la charge entre les différents nœuds du réseau.

**LBC (Load Balanced Clustering)**[49] et **GLBCA (Greedy Load Balanced Clustering Algorithm)** [50] permettent de gérer la distribution équitable de la charge du réseau entre les différents cluster-heads qui sont des super-nœuds. Ces derniers doivent avoir toutes les informations sur tous les nœuds du réseau. **LBC** est basé sur la position géographique des nœuds et sur l'énergie résiduelle de ces derniers. Afin que les nœuds ordinaires puissent rejoindre leur cluster-head respectif, les super-nœuds doivent diffuser les informations de partitionnement dans le réseau. Pour la mise à jour de ces informations, les super-nœuds doivent recalculer le partitionnement et retransmettre leurs décisions aux nœuds ordinaires. Ceci augmente la consommation d'énergie et le temps de latence. Ainsi, **GLBCA et LBC**

ont du mal à être rapidement évolutifs puisqu'ils exigent que les super-nœuds aient une connaissance globale sur tout le réseau.

Ces protocoles n'adoptent pas de métriques dans le choix des cluster-heads. C'est plutôt c'est la nature même du nœud qui lui permet de jouer ce rôle. Toutefois, ces algorithmes sont performants en termes de qualité de service mais ne sont pas adaptés aux RCSF de grandes envergures car le passage à l'échelle, dans une approche centralisée, augmente la complexité protocolaire et l'échange de messages entre nœuds. Pour certaines approches les super nœuds doivent connaître la position de tous les nœuds du réseau à tous moments. L'opération d'échange de messages est alors très coûteuse en termes de consommation d'énergie d'autant plus quand le réseau est dense et large. Dans la section suivante, nous allons proposer une approche cross-layer basée sur un algorithme de clusterisation pour un RCSF de grande dimension. Dans cette approche, nous avons tiré profit des atouts des algorithmes existants afin de prolonger la durée de vie du réseau et d'assurer une qualité de service minimale requise.

### 3.2.4 les Algorithmes de clustering basé sur la théorie des jeux pour les réseaux de capteurs sans fil :

La théorie des jeux est une nouvelle branche des mathématiques modernes. Il considère principalement les stratégies et les bénéfices pour les joueurs, et étudie leurs stratégies d'optimisation. actuellement , le L'application de la théorie des jeux dans les RCSFs devient de plus en plus étendue, principalement utilisé dans l'efficacité énergétique, la sécurité des communications, le contrôle de l'alimentation, l'acquisition de données, Dans [51], les auteurs proposent un algorithme centralisé où la station de base détermine le nombre de clusters et les nœuds qui deviendront des chefs de cluster (clusterheads), en se basant sur la localisation et l'énergie restante de chaque nœud. Ils démontrent que cette méthode de sélection des chefs de cluster est plus économe en énergie que la sélection aléatoire selon l'algorithme LEACH. Cependant, cette approche manque d'analyse théorique et la sélection centralisée des chefs de cluster engendre une surcharge qui consomme davantage d'énergie. Dans l'article [52], les chercheurs développent un jeu coopératif impliquant les nœuds d'un réseau de capteurs sans fil. Les gains pour chaque nœud dépendent de trois facteurs principaux : la réputation, la coopération et la qualité de la sécurité. La réputation correspond à la puissance du signal reçu, la coopération est quantifiée par le pourcentage de paquets transmis avec succès, et la qualité de la sécurité est mesurée par le ratio entre les messages échangés avec succès et les messages échoués. La stratégie des participants se traduit par une probabilité de coopération. Les chefs de cluster sont désignés au départ, mais la mobilité des nœuds peut provoquer des changements dans la structure des clusters, entraînant la formation de nouveaux clusters ou la dissolution d'anciens. Les simulations indiquent que même si le nombre initial de clusters est élevé, la coopération entre les nœuds augmente avec le temps, permettant au réseau d'atteindre un nombre stable de chefs de cluster. Bien que cette méthode semble nécessiter moins d'échanges de messages comparée aux techniques basées uniquement sur la distance, les auteurs ne fournissent aucune donnée sur la consommation d'énergie, un élément essentiel pour les réseaux de capteurs. En outre, l'algorithme vise principalement à préserver la confiance et la robustesse entre les capteurs. Cependant, les auteurs n'expliquent pas comment le système réagirait avec des nœuds statiques, où les variations de proximité entre les capteurs seraient différentes. Dans [53], un algorithme de clustering économe en énergie combiné à la théorie des jeux a été proposée, utilisant un mécanisme à double tête de cluster pour réduire l'énergie consommation des nœuds capteurs. Dans [54], le clustering économe en énergie distribué existant (DEEC) pour les RCSFs hétérogènes a été amélioré. La théorie des jeux a été utilisée comme algorithme d'optimisation, et la probabilité que le nœud devienne un chef de cluster était ajusté en fonction de l'énergie résiduelle, prolongeant ainsi la durée de vie des clusters. dans [55], la théorie des jeux a été utilisée pour modéliser le clustering pour les réseaux de capteurs sans fil. Comme les CH consomment beaucoup plus d'énergie que les nœuds normaux, un nœud égoïstement abdique de servir de CH au profit d'autres nœuds pour la conservation de l'énergie. Cependant, si chaque nœud refuse pour être le CH, alors les gains de tous les nœuds de capteurs sont nuls puisque leurs données de détection ne peuvent pas être transmises à station de base effectivement. Pour parvenir à un compromis entre les économies d'énergie et la fourniture des services requis, chaque capteur

est considéré comme un joueur pour faire campagne pour le CH en participant à un jeu de clustering. La stratégie mixte est adoptée dans ce jeu, et chaque joueur acquiert une probabilité d'équilibre d'être CH une fois le jeu terminé. Chaque nœud décide s'il doit être un CH selon la probabilité d'équilibre correspondante afin que son gain puisse maintenir l'état d'équilibre. Bien que CROSS ait montré un bon paradigme pour modéliser le regroupement dans des réseaux de capteurs sans fil en utilisant la théorie des jeux, le problème principal est qu'il suppose que tous les capteurs les nœuds du réseau peuvent échanger des informations entre eux, ce qui n'est pas très réaliste. Pour résoudre ce problème, un protocole (LGCA) a été présenté dans [56]. En jouant à un jeu de clustering localisé avec les voisins proches, chaque nœud capteur peut atteindre un équilibre probabilité d'être le CH et décide égoïstement s'il doit être le CH en fonction de cette probabilité. Éviter Dans le cas où plusieurs CH se produisent dans une zone restreinte localisée, les nœuds s'auto-sélectionnent avec succès car les CH doivent continuer à courir pour devenir les CH finaux. Ensuite, un mécanisme de contention MAC est adopté pour garantir qu'un seul CH final est restreint dans une zone spécifique. Par rapport à CROSS, LGCA est plus réalisable car il est entièrement distribué et facilement extensible. Comme récompense pour un nœud de capteur lorsque le choix des différentes stratégies n'est pas spécifiquement défini du point de vue de l'énergie des capteurs dans CROSS et LGCA. un protocole (HGTD), a été proposé dans [57]. Chaque nœud joue au même jeu de clustering localisé que celui-ci en LGCA. Étant donné que les nœuds avec plus de voisins et des distances plus longues jusqu'à station de base ont des coûts plus élevés pour servir de nœuds. Les CH, le degré du nœud et la distance jusqu'à la station de base sont pris en compte simultanément lors de la définition des gains des nœuds. De plus, un algorithme itératif est présenté pour limiter le fait qu'un seul CH puisse être sélectionné dans un environnement localisé. limiter. Des résultats de simulation approfondis confirment que HGTD a encore amélioré la durée de vie du réseau.

### 3.3 Notre proposition :LEACH basé sur la théorie de jeux

Le routage hiérarchique est l'une des approches les plus performantes en termes d'efficacité énergétique. En effet, le partitionnement d'un grand réseau en sous réseaux ou clusters est une stratégie adoptée pour minimiser la consommation d'énergie, pour faciliter le passage à l'échelle et pour assurer la stabilité du réseau [58]. LEACH est considéré comme étant le premier protocole de routage hiérarchique. Il est l'algorithme de routage hiérarchique le plus populaire pour les RCSF. Néanmoins, LEACH a certaines limitations et il n'est pas bien adapté aux RCSF à grandes dimensions pour les raisons énumérées ci-dessous :

- Chaque cluster-head fait l'agrégation des données reçues de ses nœuds membres et les transmet directement à la station de base. Par conséquent, ceci nécessite une forte puissance de transmission.
- La sélection des cluster-heads est probabiliste. Par conséquent, les nœuds ayant des réserves énergétiques faibles peuvent être élus pour devenir des chefs de clusters.

Pour lever ces limitations, nous proposons une nouvelle méthode de sélection des cluster-heads basé sur la théorie de jeux visant à exploiter de manière équitable l'énergie des nœuds choisis tout en réduisant la consommation d'énergie lors de la transmission des données à la station .

#### 3.3.1 Les étapes du protocole proposé

##### le model de jeu propos

nous proposons un modèle de jeu non coopératif décrivant le comportement stratégiques des nœuds dans un réseaux de capteur sans fil n nœud . Dans ce modèle, chaque nœud de réseau est considéré comme un joueur qui cherche maximiser son utilité individuelle, la fonction d'utilité d'un joueur dépend de plusieurs paramètres tels que l'énergie résiduelle, la distance entre le nœud et la station de base . A fin de modéliser cette situation sous forme d'un jeu, nous devons définir les principaux éléments constitués un jeu qui sont

- **les joueurs** : les joueurs intervenant dans cette situation sont les noeuds de réseaux, donc on a l'ensemble des joueurs noté par  $I = 1...n$  et on note un joueur par  $i \in I$
- **les stratégies des joueurs** : chaque joueur  $i$ ,  $i \in I$  dispose de deux stratégies ,soit se déclarer chef du cluster,soit ne pas se déclarer chef du cluster, donc l'ensemble de stratégie de chaque joueur  $i \in I$  est notée par

$$S_i = \begin{cases} \text{Se déclarer chef du cluster} \\ \text{Ne pas déclarer chef de cluster} \end{cases} \quad (3.8)$$

on note la stratégie Se déclarer chef du cluster par  $s_i^1$ ,  $\forall i \in I$  et la stratégie ne pas déclarer chef du cluster est notée par  $s_i^2$ ,  $\forall i \in I$

la stratégie  $s_i^1$ ,  $\forall i \in I$ , prend les formes suivantes :

1 - Stratégie basée sur l'énergie résiduelle à la station de base

$$s_i^1 = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{res} \text{ est maximale} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.9)$$

2 - Stratégie basée sur la distance minimale à la station de base .

$$s_i^1 = \begin{cases} 1 & \text{si } d \text{ est minimale} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.10)$$

3 - Stratégie basée sur l'énergie résiduelle maximale et la distance minimale .

$$s_i^1 = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{res} \text{ maximale et } d \text{ minimale} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.11)$$

cette stratégie combine a la fois l'énergie et la distance lors de la prise de decision.

la stratégie  $s_i^2$ ,  $\forall i \in I$  prend la forme suivante :

$$s_i^2 = 0, \forall i \in I$$

Donc l'ensemble de stratégie de chaque joueur  $i \in I$  est

$$s_i = \{ s_i^1, s_i^2 \} \quad (3.12)$$

- **les utilités des joueurs** :

la fonction d'utilité du joueur  $i$ ,  $i \in I$  est notées par  $u_i$  avec  $u_i = f(E_i, d_i)$

ou  $f$  est une fonction qui représente les relation entre les paramètres d'énergie et de distance de chaque joueur  $i \in I$ , on obtient donc le jeu sous forme normale

$$\langle I, \{ s_i \} i \in I, \{ u_i \} i \in I \rangle \quad (3.13)$$

L'étape la plus importante consiste la sélection de nœuds les plus proches la station de base avec une plus grande capacité d'énergie en tant que chefs de cluster (CHs). Pour atteindre cet objectif, nous utilisons une formule qui calcule le rapport d'énergie actuelle, notée  $E_{res}$ , sur l'énergie initiale  $E_0$ , et la distance noté  $d$  pour la distance enter un noeud et la station de base et Pour l'énergie Le nouveau seuil, prenant en compte l'énergie, est dérivé d'une formule existante [6] que nous avons adaptée pour correspondre à notre objectif. Il est calculé selon la fonction suivante :

$$p_{i_1}(t) = (p/(1 - p(r \text{ mod } n/p))) \times \left( \frac{E_{-res}}{E_0} \right) \quad (3.14)$$

où

$p$  : la probabilité de devenir un CH.

$E_0$  : l'énergie initiale du nœud.

$E_{-res}$  : l'énergie résiduelle du nœud.

Dans les réseaux de capteurs, différentes contraintes telles que la capacité de calcul, la mémoire et les ressources énergétiques sont présentes. Pour surmonter ces contraintes, On utilisant cette formule, on cherche à augmenter la probabilité que certains nœuds du réseau soient élus en tant que Cluster Heads (CH). En ayant plus de nœuds CH dans le réseau, la charge de travail est répartie entre eux. Cela signifie que chaque CH gère un groupe plus restreint de nœuds capteurs, ce qui réduit la charge qui pèse sur chaque CH. Ils peuvent ainsi effectuer leurs tâches de manière plus efficace. Lorsque plusieurs nœuds tentent de devenir des CH en même temps, cela peut entraîner des collisions et des conflits. En augmentant la probabilité de sélection des CH de manière plus répartie grâce à la formule, on réduit la probabilité de telles collisions. Cela garantit que les nœuds CH sont sélectionnés de manière plus équilibrée dans le temps.

Si nous prenons deux nœuds  $n_1, n_2$  avec des énergies respectives  $E_{res} < E_{res}$  nous ,aurons

$$pi_1(t)(n_1) < pi_1(t)(n_2) \quad (3.15)$$

Pour intégrer la distance entre le nœud et la station de base, nous utilisons la formee suivante :

$$pi_2(t) = (p/(1 - p(r \text{ mod } n/p)) \times (dmax/d) \quad (3.16)$$

où :

$d_{max}$  : la distance maximale entre la station de base et un nœud.

$d$  : la distance entre le nœud et la station de base.

L'objectif est de privilégier les nœuds proches de la station de base pour qu'ils deviennent des CH, car une réduction de distance permet d'économiser de l'énergie lors de l'envoi de données à la station de base.

Si nous avons deux nœuds  $n_1, n_2$  avec des distances respectives  $d_1 < d_2$ , alors

$$pi_2(t)(n_1) > pi_2(t)(n_2) \quad (3.17)$$

Enfin, pour combiner à la fois l'énergie et la distance, nous proposons une fonction améliorée qui calcule la propriété de chaque nœud en combinant son énergie résiduelle et sa distance par rapport à la station de base. Le nœud avec la valeur maximale s'auto-déclare comme CH.

$$utilite = \frac{\frac{E_{res}}{d}}{\frac{E_0}{dmax}} \quad (3.18)$$

Le nouveau seuil, prenant en compte à la fois l'énergie et la distance, est calculé comme suit :

$$pi_3(t) = (\alpha \times pi_1(t) + \beta \times pi_2(t))^{utilite} \quad (3.19)$$

où :

$\alpha, \beta$  : constantes de pondération avec  $\alpha = 0,15$  et  $\beta = 0,85$

$\alpha + \beta = 1$

Cette formule permet de sélectionner les nœuds avec plus d'énergie et moins de distance par rapport à la station de base en tant que CHs. L'idée de cette amélioration est de combiner les formules  $pi_1(t)$  et  $pi_2(t)$ , puis d'attribuer des valeurs à  $\alpha$  et  $\beta$  Après des ajustements  $\alpha$  et  $\beta$  il ont obtenu les meilleurs résultats pour améliorer la durée de vie des réseaux de capteurs sans fils.

- **Ordonnancement des tâches :** Les clusters sont formés, et chaque cluster-head utilise un protocole MAC TDMA pour organiser les transmissions des nœuds de son cluster et allouer des intervalles de temps pour envoyer les données vers le cluster-head ou la station de base.

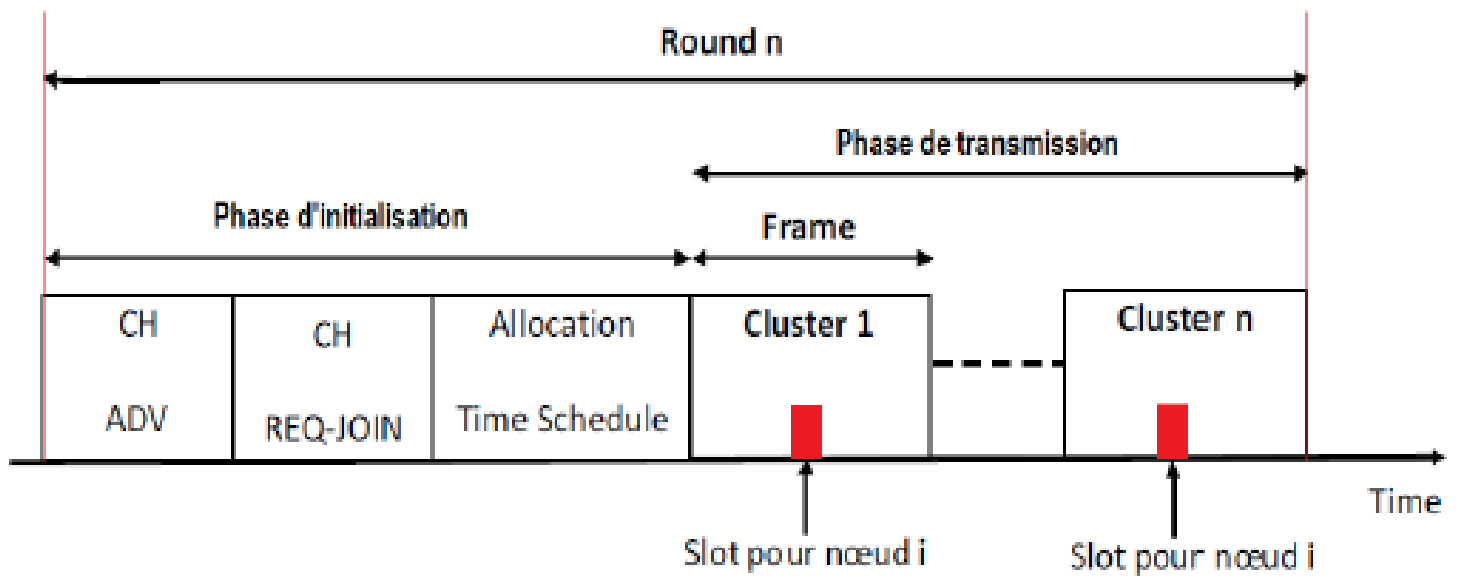


FIGURE 3.5 – Répartition du temps et différentes phases pour chaque round

3.3.2 Le diagramme qui représente les étapes de protocole modifié avec notre proposition basé sur la théorie de jeux

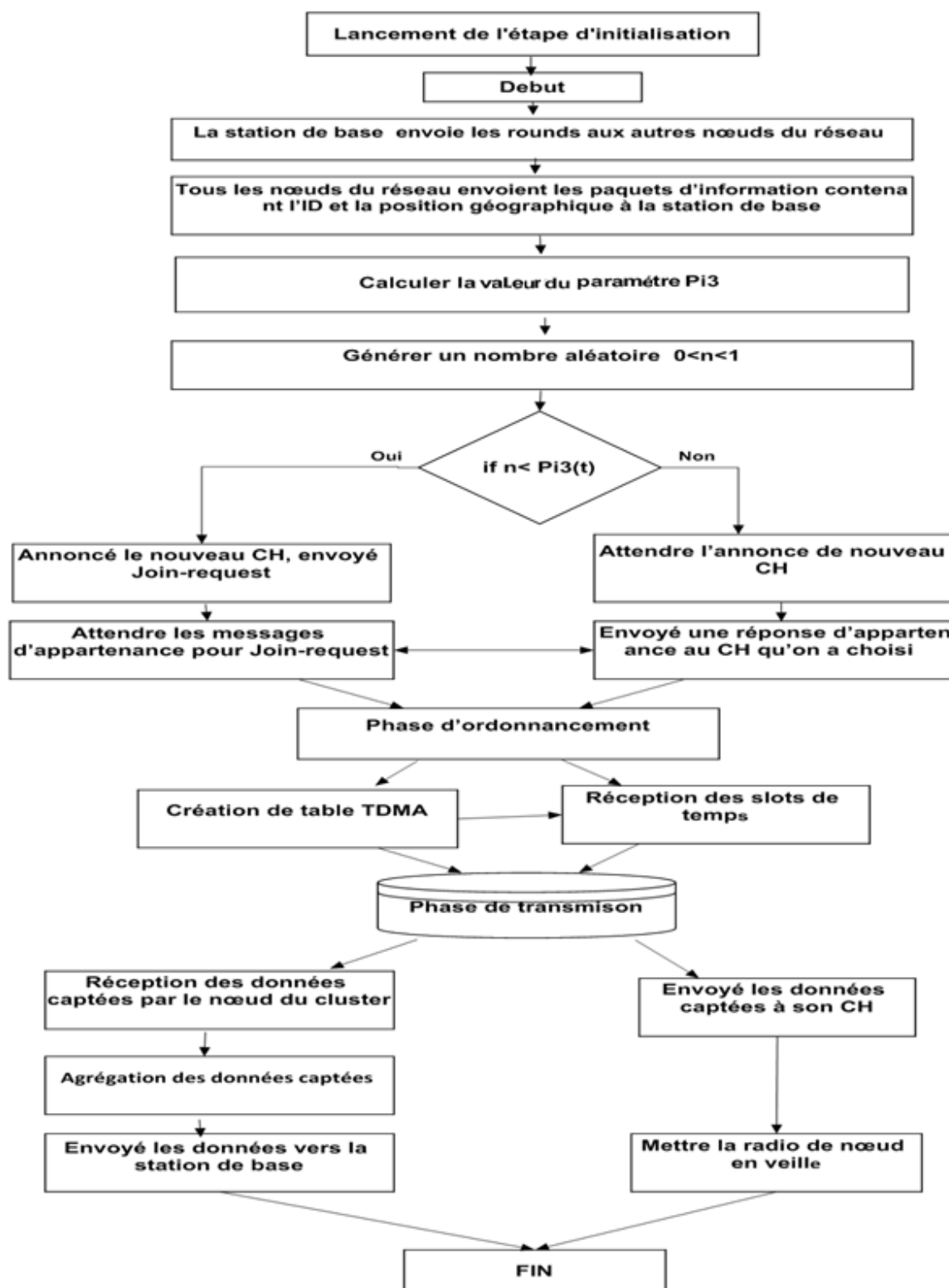


FIGURE 3.6 – Le diagramme qui représente les étapes de protocole modifier avec notre proposition

### 3.3.3 L'algorithme proposé pour la sélection des clusters-heads

```

1 n_c : nombre total de capteurs
2 E_0 :inergie initiale
3 c-h head cluster
4 E_res : liste d'énergie résiduelle pour chaque capteur
5 d : liste de distance entre chaque capteur et la station de base
6 id : liste d'identifiant de cluster head pour chaque capteur
7 nb_ch : nombre de cluster heads
8 c_i:un neud capture
9 U_max : utilité maximale
10 ch_choisi : identifiant du cluster head choisi
11 t(n):le seuil
12 n :nombre aléatoire
13 a : constante entre 0 et 1
14 b : constante entre 0 et 1
15 p : pourcentage de CHs dans la topologie
16 d_max : distance maximale entre le nœud et la station de base
17 s:le slot de chaque neud dans le cluster

```

```

18 Fonction utilite(E_res, d) :
19     Si d = 0 :
20         Retourner -∞ # Éviter la division par zéro
21     Sinon :
22         Retourner E_res / d
23
24 Pour chaque C_i allant de 1 à n_c :
25     n = randomnumber(0, 1)
26     Eni[c_i]=E_0
27     dis[C_i] = d
28     t(n) = (a * (p / (1- p * (r mod n_c / P)) * (E_res / E_0))
29     + b * (p / (1 - P * (r mod n_c / P)) * (d_max / d))
30     )^(utilite(E_res, d)/utilite(E_0, d_max))
31     Si n <= t(n) :
32         id[C_h] = id[C_i]
33         nb_ch = nb_ch + 1
34         adv = id[C_h]
35         envoyer(join_req)
36         Si decision[C_i] = vrai :
37             ADV = id[C_i] + id[C_h]
38             renvoyer(join_req)
39         Sinon :
40             supprimer(join_req)
41         Fin Si
42     Fin Si
43 fin pour

```

```

44 pour c_h allant de 1 jusqu'a n_c faire
45 créer la table TDMA
46 slote(c-h)=s
47 transmission TDMA
48 fin pour
49 fin de programme

```

Nous présenterons en détail l'implémentation d'un protocole d'ordonnancement de Cluster Head (CH) basé sur les principes de la théorie des jeux. Ce protocole vise à la sélection des chefs de cluster et l'attribution des créneaux de transmission à l'aide de l'algorithme proposé inspirer du protocole LEACH, mais intègre des concepts de la théorie des jeux pour améliorer l'efficacité énergétique, et la performance globale du réseau de capteurs. L'algorithme se divise en deux phases majeures : l'initialisation et l'ordonnance-



ment. Nous commencerons par présenter les variables et constantes utilisées dans le protocole, puis nous expliquerons chaque phase du processus en mettant en évidence les concepts de la théorie des Jeux.

#### a Phase d'initialisation

ette phase consiste à itérer à travers chaque capteur et à évaluer s'il devrait devenir un CH ou non en utilisant les concepts de la Théorie des Jeux. Chaque capteur prend une décision basée sur son utilité individuelle calculée à l'aide de la fonction d'utilité. Si la valeur aléatoire générée ( $n$ ) est inférieure ou égale à une valeur calculée ( $t_n$ ) basée sur les paramètres  $a$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $d_{max}$ , le capteur décide de devenir un CH. Sinon, il choisit de ne pas devenir un CH.

#### b Phase d'ordonnement

Les CHs sont responsables de coordonner les transmissions pour les capteurs membres de leur cluster. Dans cette phase, les créneaux de transmission sont planifiés pour chaque nœud membre du cluster en utilisant le schéma TDMA. Cette planification est réalisée pour minimiser les collisions et garantir des transmissions ordonnées.

- **Assignation de Créneaux de Temps** : Les cluster heads sont sélectionnés dans la phase d'initialisation. Dans cette phase, chaque cluster head répartit équitablement les créneaux de temps entre les membres du cluster en utilisant l'algorithme TDMA.
- **Transmissions Coordonnées** : Les capteurs transmettent leurs données aux cluster heads aux moments désignés par les créneaux de temps. Cela permet une utilisation efficace du spectre et réduit les interférences.
- **Résultats Attendus** : L'algorithme proposé vise à optimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil en sélectionnant judicieusement les cluster heads et en coordonnant les transmissions. En utilisant des concepts de la théorie des jeux, les capteurs sont incités à prendre des décisions qui maximisent leur utilité individuelle tout en contribuant à l'efficacité globale du réseau. en compte les utilités individuelles des capteurs ainsi que d'autres paramètres pour déterminer s'ils devraient ou non devenir des CHs.

### 3.3.4 Le modèle d'énergie utilisé dans notre approche

La communication entre les capteurs au sein d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est une partie extrêmement sensible, notamment en termes de consommation d'énergie. Dans l'anatomie d'un capteur, l'unité de communication est composée d'un émetteur/récepteur qui consomme plus d'énergie par rapport aux autres composants du système. Cette consommation d'énergie est influencée par plusieurs facteurs, tels que la quantité de données à transmettre, la distance de transmission, les caractéristiques physiques du module radio et la puissance d'émission. Lorsque la puissance d'émission est élevée, la portée du signal est étendue, mais cela entraîne également une consommation d'énergie plus élevée.

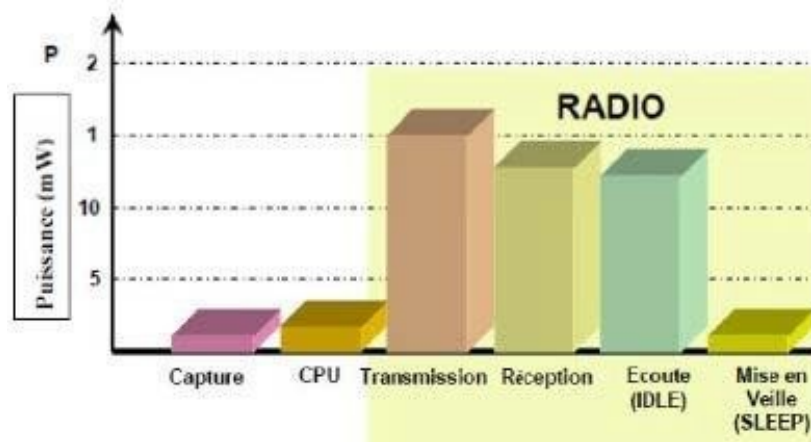


FIGURE 3.7 – Consommation d'énergie en acquisition, traitement et communication

Pour évaluer la quantité d'énergie consommée par un capteur pendant la phase de communication, nous utilisons un modèle spécifique au domaine des communications radio à faible consommation, proposé par Heinzelman et al. Cela permet de gérer les émissions et les réceptions des nœuds pour optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

Cet algorithme basé sur le modèle radio utilise deux termes distincts : le modèle d'espace libre et le modèle de canal d'évanouissement à trajets multiples.

- a **Le modèle de propagation en espace libre :** Le modèle de propagation en espace libre (Free Space) est utilisé pour prédire la puissance du signal reçu lorsque l'émetteur et le récepteur ont une ligne de visée directe entre eux (line-of-sight). Ce modèle est utilisé lorsque le signal peut se propager directement sans être obstrué par des obstacles.
- b **Le modèle de canal à évanouissement à trajets multiples :** En présence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur, le modèle à trajets multiples est utilisé. Dans ce cas, plusieurs répliques du signal émis atteignent le récepteur par plusieurs chemins, chacun ayant des caractéristiques d'atténuation, de déphasage et de retard différents (dus à la longueur du chemin). Cependant, la présence de trajets multiples dans un canal radio peut causer des phénomènes d'évanouissement, c'est-à-dire des variations soudaines et imprévisibles de la puissance du signal.

Lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur est inférieure à une valeur seuil appelée « d crossover », l'algorithme utilise le modèle d'espace libre ( $d^2$  perte de puissance). Dans le cas contraire, il adopte le modèle de canal à évanouissement à trajets multiples ( $d$  perte de puissance). Par conséquent, si un émetteur envoie un message d'1 bit à un récepteur jusqu'à une distance de « d », la consommation d'énergie de l'émetteur et du récepteur peut être calculée à l'aide des équations suivantes :

$$ET_x(k, d) = ET_x(k) + ET_{xamp}(k, d) \quad (3.20)$$

$$ET_x(k, d) = \left\{ \begin{array}{ll} k \times E_{elec}(k, d) + k \times \epsilon_{amp} \times d^2 & \text{si } d < d_{crossover} \text{ (1)} \\ k \times E_{elec}(k, d) + k \times \epsilon_{amp} \times d^4 & \text{sinon(2)} \end{array} \right\}. \quad (3.21)$$

où :

$ET_x(k, d)$  est la consommation d'énergie de l'émetteur lorsqu'il envoie un message de « k » bits au récepteur.

$ET_x(k)$  est la consommation d'énergie spécifique à l'émission du message de « k » bits.

$ET_x(k, d)$  est la consommation d'énergie du circuit d'émission-réception sans fil pour un message de « k » bits à une distance « d ».

$\epsilon_{amp}$  et  $\epsilon_{mch}$  sont des facteurs d'amplification spécifiques à l'espace libre et aux trajets multiples respectivement.

$d_{crossover}$  est la distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur

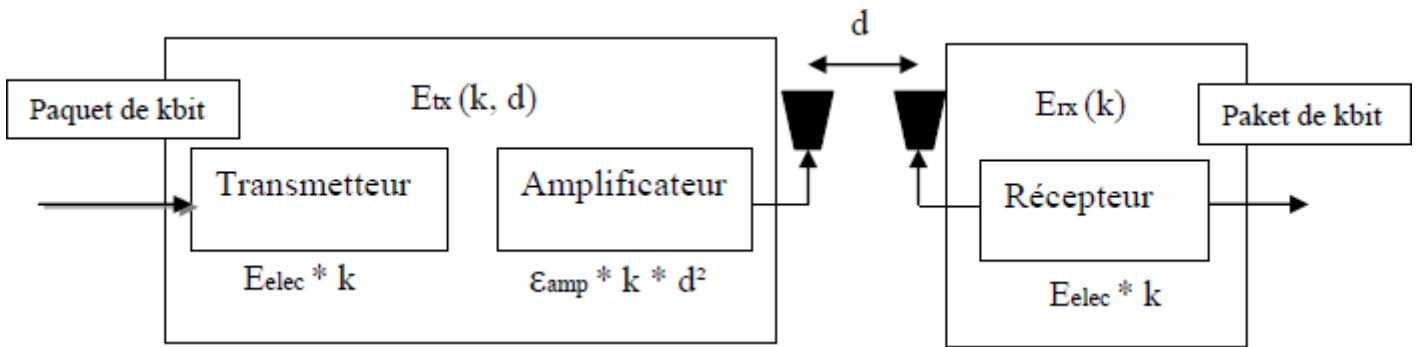


FIGURE 3.8 – Répartition du temps et différentes phases pour chaque round

En résumé, le modèle d'énergie utilisé prend en compte à la fois la distance entre les nœuds, les caractéristiques du canal de communication et les facteurs d'amplification pour estimer la consommation d'énergie lors de la communication entre les capteurs dans le réseau. Ce modèle est crucial pour évaluer l'efficacité énergétique du protocole amélioré que nous proposons dans le cadre de notre solution pour la conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils.

### 3.3.5 Comparaison entre notre l'algorithme basé sur la théorie de jeux et le protocole LEACH

Aspect	Protocoles basés sur la théorie des jeux	Protocole LEACH
Complexité de l'algorithme	Plus complexe en raison des calculs basés sur la théorie des jeux et des fonctions d'utilité	Plus simple et facile à implémenter
compréhension et gestion	Requiert une compréhension plus avancée de la théorie des jeux , ce qui peut rendre la gestion plus difficile	plus facile à comprendre et à gérer pour les praticiens
équilibre énergétique	offrir un meilleur équilibre énergétique en utilisant des critères complexes de sélection des cluster heads	Peut manquer de précision en terme d'équilibre énergétique , mais reste plus simple.
Adaptation aux environnements changeants	s'adapter aux environnements changeants en ajustant les stratégies des noeuds	Moins flexible pour s'adapter rapidement aux changements.
Répartition des responsabilités	permettre une répartition des responsabilités plus équitable grâce à l'évaluation des utilités	Moins de garantie quant à une répartition équilibrée des responsabilités
Gestion des ressources	optimiser l'utilisation des ressources , prolongeant ainsi la durée de vie du réseau	Utilisation plus simple des ressources , mais avec moins d'optimisation.

TABLE 3.1 – Comparaison entre l'algorithme basé sur la théorie de jeux et le protocole LEACH

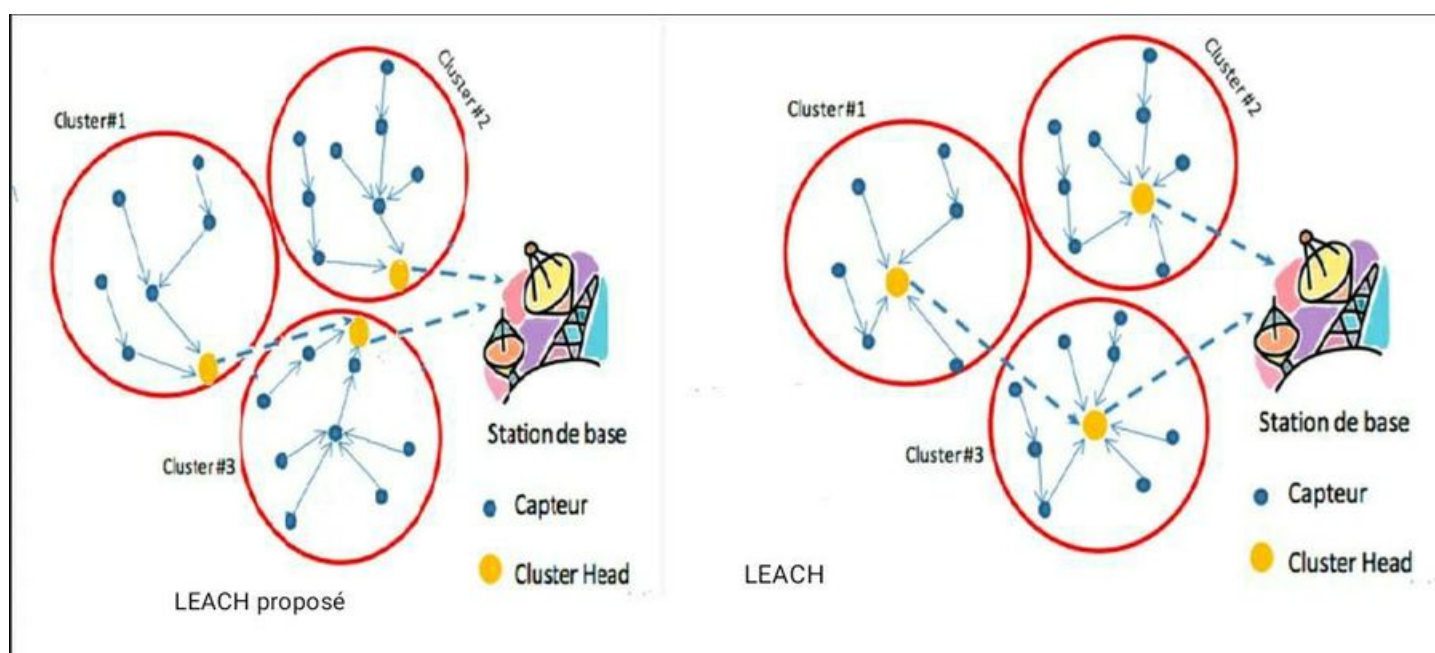


FIGURE 3.9 – Comparaison entre LEACH proposé et LEACH

## 3.4 L'énergie restera-t-elle une problématique pour les RCSF :

La recherche de sources d'énergie durables pour les solutions matérielles basées sur la régénération d'énergie est un défi majeur. Contrairement aux réseaux de capteurs alimentés par des batteries, les sources d'énergie environnementales sont imprévisibles et variables dans le temps. Cela pose plusieurs défis, notamment la nécessité de concevoir des protocoles pour équilibrer la source et la demande d'énergie, la gestion de cycles de devoir dynamiques pour s'adapter à la disponibilité d'énergie changeante, et la remise en question de la notion de durée de vie du réseau en raison de la variabilité de la source d'énergie.

Bien que des progrès aient été réalisés, des défis subsistent, comme la décharge automatique des batteries, nécessitant une recherche continue pour des solutions plus efficaces.

### 3.4.1 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technique de routage hiérarchique qui est largement utilisée dans les RCSFs. Plusieurs travaux sur les algorithmes de clustering ont été proposés dans la littérature. En effet, cette technique vise à remédier aux problèmes de consommation d'énergie. nous avons fait une analyse détaillée des approches de clusterisation. L'inconvénient majeur de la majorité de ces approches est qu'elles ne sont pas adaptées aux réseaux de capteurs denses. Ceci constitue une limitation majeure dans la stabilité de la topologie du réseau. Cette étude est utile afin de tirer profits des algorithmes de routage en clustering proposés et de mettre en exergue leurs limitations pour améliorer un algorithme de clustering basée sur théorie des jeux. L'amélioration du protocole LEACH en intégrant des concepts de la théorie des jeux présente une méthode innovante pour sélectionner les "cluster-heads". Cette approche prend en considération des facteurs clés tels que l'énergie résiduelle des nœuds et leur distance par rapport à la station de base, ce qui se traduit par une gestion plus équilibrée et efficace des ressources. Toutefois, pour valider pleinement cette proposition et la rendre plus robuste sur le plan académique, des simulations et des résultats empiriques seront nécessaires. Ces prochaines étapes viseront à démontrer de manière convaincante l'impact positif de notre approche sur la durée de vie et la performance des réseaux de capteurs sans fils.

## Chapitre 4

# *Implémentation et évaluation de protocole proposé*

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'implémentation de notre protocole et évaluer ses performances en utilisant des simulations. l'objectif de ces simulations est de démontrer l'efficacité de notre approche par rapport au protocole LEACH standard déjà existant. Nous allons comparer notre proposition à cette approche existante en utilisant plusieurs métriques pour évaluer les performances. Nous illustrerons les résultats de nos simulations à l'aide d'un tableaux que nous exposerons et interpréterons. À travers ces résultats de simulation, nous démontrerons que notre protocole a atteint ses objectifs avec succès.

## 4.2 Les simulateurs de réseaux de capture sans fil

Un simulateur de réseaux de capture sans fil est un outil informatique qui permet de modéliser et de simuler le comportement des réseaux de capteurs sans fil. Ces simulateurs sont largement utilisés en recherche et développement pour concevoir, analyser et évaluer des systèmes de RCSF avant leur déploiement réel. Ils permettent de recréer virtuellement un environnement de RCSF en prenant en compte divers paramètres tels que la topologie du réseau, la disposition des capteurs, les modèles de communication sans fil, les protocoles de routage, les scénarios de mobilité des capteurs, et les modèles de trafic de données. Les simulateurs de RCSF sont conçus pour aider les chercheurs à comprendre le comportement du réseau dans différentes conditions et à évaluer ses performances en termes de latence, de consommation d'énergie, de fiabilité, et d'autres métriques importantes.

Parmi les simulateurs de RCSF les plus connus, on peut citer :

Ns simulator

TOSSIM

OMNeT++



FIGURE 4.1



FIGURE 4.2



FIGURE 4.3



FIGURE 4.4

Ces outils permettent aux chercheurs de mener des expériences virtuelles pour optimiser les paramètres de leurs réseaux de capteurs sans fil, tester des protocoles de communication, et élaborer des stratégies de déploiement plus efficaces, contribuant ainsi au développement de solutions plus performantes et fiables dans divers domaines d'application.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'utiliser NS-3 (Network Simulator 3) pour simuler nos scénarios de réseaux de capteurs sans fil. Plus précisément, nous avons utilisé la version NS-3-allinone 3.19. NS-3 est un simulateur de réseau open-source qui offre de vastes fonctionnalités pour la modélisation et la simulation de réseaux de communication. NS-3 est particulièrement apprécié dans la communauté de la recherche en raison de ses capacités de modélisation avancées, de sa flexibilité et de sa facilité d'extension. La version NS-3-allinone 3.19 que nous avons utilisée contient toutes les bibliothèques et les outils nécessaires pour simuler et évaluer les performances de nos protocoles de réseaux de capteurs sans fil. Cette version spécifique de NS-3 nous a permis de configurer et d'exécuter nos simulations de manière précise, en utilisant les fonctionnalités les plus récentes et les propositions apportées au simulateur. En utilisant NS-3-allinone 3.19, nous avons pu mener des expériences approfondies pour évaluer les performances de notre protocole proposé par rapport aux protocoles existants dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil.

nous présentons les résultats de la simulation de deux protocoles de communication pour les réseaux de capteurs sans fil : le protocole LEACH standard et notre version proposée. L'objectif de cette simulation était de déterminer lequel de ces deux protocoles offre les meilleures performances en termes de durée de vie du réseau.

### 4.3 Les paramètre de réseaux

### 4.4 Méthodologie de Simulation

Pour mener à bien cette simulation, nous avons utilisé un environnement de simulation de réseaux de capteurs sans fil. Le scénario de simulation était composé de plusieurs exécutions distinctes, chacune représentant une période de fonctionnement du réseau. Pour chaque exécution, nous avons mesuré le



Description par défaut	La valeur
Nombre de nœuds dans le réseau	50
Taille en X du réseau	100
Taille en Y du réseau	100
Puissance de batterie initiale des capteurs	0.75
Pourcentage de capteurs de cluster	0,05
Nombre total de rounds de simulation	2000
Distance de transmission pour l'ordonnancement	25
Taille du message pour l'ordonnancement	16
Position X par défaut de la station de base	102
Position Y par défaut de la station de base	103
Longueur d'un message	8

TABLE 4.1 – Les paramètre de réseaux

nombre de périodes pendant lesquelles le réseau est resté opérationnel, avec une "période" étant définie comme une unité de temps prédéterminée.

Nous avons comparé les performances des deux protocoles,

LEACH standard et LEACH proposé, en mesurant le nombre de périodes pendant lesquelles le réseau est resté actif. Une période d'activité du réseau signifie que les nœuds capteurs étaient capables de collecter, traiter et transmettre des données de manière efficace. Plus le nombre de périodes actives est élevé, meilleure est la durée de vie du réseau.

## 4.5 Résultats de la Simulation

Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau et la courbe ci-dessous. Chaque ligne du tableau représente une exécution distincte de la simulation. Les colonnes "Nombre de périodes LEACH standard" et "Nombre de périodes LEACH proposé" indiquent respectivement le nombre de périodes pendant lesquelles chaque protocole a maintenu le réseau actif.

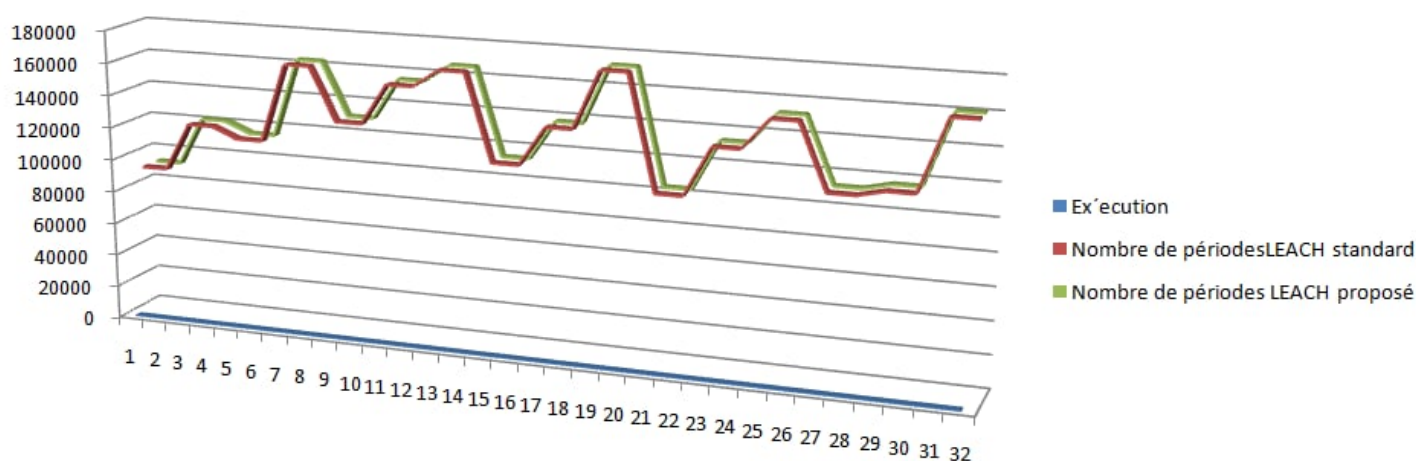


FIGURE 4.5 – Courbe représente le nombre de période pendant lesquelles chaque protocole a maintenu le réseaux actif a chaque exécution.

Exécution	Nombre de périodes LEACH standard	Nombre de périodes LEACH proposé
1	91398	91405
2	91398	91405
3	120645	120653
4	120645	120653
5	114109	114116
6	114109	114116
7	162231	162229
8	162231	162229
9	129813	129816
10	129813	129816
11	154605	154612
12	154605	154612
13	165442	165441
14	165442	165441
15	112801	112811
16	112801	112811
17	136570	136577
18	136570	136577
19	172130	172126
20	172130	172126
21	102867	102874
22	102867	102874
23	132882	132889
24	132882	132889
25	151435	151439
26	151435	151439
27	111995	112002
28	111995	112002
29	115758	115765
30	115758	115765
31	159839	159846
32	159839	159846

TABLE 4.2 – Résultats de la Simulation

## 4.6 Analyse des Résultats

L'analyse des résultats de la simulation montre que le protocole LEACH proposé surpasse le LEACH standard en termes de durée de vie du réseau. Dans chaque exécution de la simulation, le nombre de périodes pendant lesquelles le réseau est resté actif était légèrement plus élevé avec le protocole LEACH proposé par rapport au LEACH standard. Cela indique que la version proposée du protocole est plus efficace pour maintenir le réseau opérationnel. Il convient de noter que, bien que les différences entre les deux protocoles puissent sembler minimes, elles sont significatives en termes de durée de vie du réseau. Ces petites propositions cumulées sur une période prolongée peuvent avoir un impact considérable sur la disponibilité du réseau de capteurs.

## 4.7 Conclusion

Sur la base des résultats de la simulation, il est recommandé d'adopter le protocole LEACH proposé pour les réseaux de capteurs sans fil lorsque l'objectif principal est de maximiser la durée de vie du réseau. Cette version améliorée offre des performances légèrement supérieures en termes de maintien du réseau actif par rapport au LEACH standard, ce qui la rend plus appropriée pour les applications nécessitant une

disponibilité prolongée du réseau. Cependant, il est essentiel de noter que le choix du protocole dépendra également des exigences spécifiques de chaque application, et d'autres facteurs tels que la consommation d'énergie, la latence et la capacité de traitement doivent être pris en compte lors de la prise de décision. Ce chapitre de simulation met en évidence l'importance de la sélection du protocole de communication adapté aux besoins de l'application et des performances globales du réseau de capteurs sans fil.

# *CONCLUSION GÉNÉRALE*

La présente étude a exploré en profondeur le domaine des réseaux de capture sans fil en utilisant une approche novatrice basée sur la théorie des jeux. Les RCSFs sont devenus un élément essentiel de la technologie de communication moderne en raison de leur utilisation dans une variété d'applications critiques, telles que la surveillance environnementale, la santé et la sécurité. L'objectif principal de cette recherche était d'analyser et d'améliorer les performances des RCSFs en utilisant des concepts de la théorie des jeux. Au cours de cette étude, plusieurs aspects cruciaux des RCSFs ont été examinés, notamment la consommation d'énergie, la qualité de service, et la durée de vie du réseau. Dans notre travail, nous nous sommes focalisés sur la problématique de la conservation de l'énergie dans un réseau de capteurs, et nous avons proposé une solution de minimisation de la consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau. Notre solution repose sur des concepts de la théorie des jeux un modèle de jeu non coopératif décrivant le comportement stratégique des nœuds dans un réseau de capteur sans fil nœud. Dans ce modèle, chaque nœud de réseau est considéré comme un joueur qui cherche à maximiser son utilité individuelle, la fonction d'utilité d'un joueur dépend de plusieurs paramètres tels que l'énergie résiduelle, la distance entre le nœud et la station de base, pour une sélection équitable des "cluster-heads" tout en minimisant la consommation énergétique lors de la sélection et des transmissions. Dans ce contexte, nous allons examiner une version améliorée du protocole hiérarchique LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarch) qui se base sur le principe du clustering. Ce protocole standard est considéré parmi les plus performants en termes d'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils (RCSFs). Nous avons évalué le modèle proposé. Cette évaluation a été basée sur des comparaisons des résultats obtenus avec des travaux de références basés sur le protocole LEACH. Les résultats obtenus démontrent les performances des approches proposées, en termes de performances énergétiques sous contraintes du respect d'une QoS requise.

---

## *Limitations*

Notre proposition peut être plus complexe à mettre en œuvre et à maintenir par rapport à des protocoles plus simples comme LEACH. Cela peut nécessiter des ressources supplémentaires en termes de matériel et de compétences techniques. L'optimisation des clusters peut entraîner un surcoût de communication lors de la formation et de la mise à jour des clusters, ce qui peut consommer de l'énergie et réduire l'efficacité globale du réseau. Bien que notre proposition puisse être efficace dans des réseaux de moyenne taille, il peut rencontrer des défis d'évolutivité dans des réseaux plus vastes, ce qui nécessite des études plus approfondies pour une adaptation efficace. L'efficacité de notre proposition peut varier en fonction de l'environnement et des conditions spécifiques de déploiement, ce qui rend nécessaire une adaptation contextuelle.

## *Perspectives*

Les chercheurs peuvent travailler sur des moyens d'optimiser l'implémentation de notre proposition pour réduire la complexité et l'overhead de communication, tout en conservant ses avantages en matière d'efficacité énergétique. Des recherches futures pourraient se concentrer sur l'adaptation de DataChow pour les réseaux de grande envergure, en explorant des mécanismes de gestion de clusters plus efficaces et des stratégies de communication optimisées. Intégrer des mécanismes de sécurité robustes dans notre proposition est crucial pour protéger les données sensibles collectées par les réseaux de capture sans fil. L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique peut améliorer la capacité de notre proposition à prendre des décisions intelligentes en temps réel, en fonction des données collectées et des besoins du réseau. Notre proposition peut être adaptée à des applications spécifiques, telles que la surveillance médicale ou la gestion de l'énergie, en fonction des besoins particuliers de chaque domaine.

# Bibliographie

- [1] Abdesselem Beghriche and Azeddine Bilami. Modélisation et gestion de la confiance dans les réseaux mobiles ad hoc. In *CIIA*, 2009.
- [2] Nabila HELAILI and Salima MEKHNACHE. Simulation du routage dans les réseaux de capteurs sans fils. *Master en Informatique, Administration et Sécurité des Réseaux, université de bijaia*, 2017.
- [3] Ian F Akyildiz, Xudong Wang, and Weilin Wang. Wireless mesh networks : a survey. *Computer networks*, 47(4) :445–487, 2005.
- [4] KHALED SAMIR FELLAH and MOHAMED BEHIH. *Analyse les performances d'un routage aléatoire sur les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2021.
- [5] Yacine Challal. Réseaux de capteurs sans fils. *Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compiègne, France*, 17, 2008.
- [6] Amal Bourmada and Azeddine Bilami. Cross-layer energy efficient protocol for qos provisioning in wireless sensor network. *International Journal of Systems, Control and Communications*, 8(3) :230–249, 2017.
- [7] Markus Peuhkuri. Ip quality of service. *Helsinki University of Technology, Laboratory of Telecommunications Technology*, pages 2–0, 1999.
- [8] Bhaskar Bhuyan, Hiren Kumar Deva Sarma, Nityananda Sarma, Avijit Kar, Rajib Mall, et al. Quality of service (qos) provisions in wireless sensor networks and related challenges. *Wireless Sensor Network*, 2(11) :861, 2010.
- [9] Samina Ehsan and Bechir Hamdaoui. A survey on energy-efficient routing techniques with qos assurances for wireless multimedia sensor networks. *IEEE communications surveys & tutorials*, 14(2) :265–278, 2011.
- [10] Nadir Bouchama, Nadia Nouali, Djamil Aïssani, Natalia Djellab, and Houari Maouchi. Extending the aodv protocol to provide quality of service in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 1st International Conference on Information Systems & Technologies (ICIST)*, 2011.
- [11] Charles Perkins, Elizabeth Belding-Royer, and Samir Das. Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. Technical report, 2003.
- [12] Marc R Pearlman and Zygmunt J Haas. Determining the optimal configuration for the zone routing protocol. *IEEE journal on selected areas in communications*, 17(8) :1395–1414, 1999.
- [13] Mario Joa-Ng and I-Tai Lu. A peer-to-peer zone-based two-level link state routing for mobile ad hoc networks. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 17(8) :1415–1425, 1999.
- [14] Pei Guangyu, M Geria, and Xiaoyan Hong. Lanmar : landmark routing for large scale wireless ad hoc networks with group mobility. In *2000 First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing. MobiHOC (Cat. No. 00EX444)*, pages 11–18. IEEE, 2000.

- [15] Nirupama Bulusu, John Heidemann, Deborah Estrin, and Tommy Tran. Self-configuring localization systems : Design and experimental evaluation. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 3(1) :24–60, 2004.
- [16] HEINZELMAN WR. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of IEEE 2000, HICSS-33*, 10, 2000.
- [17] Vinay Kumar, Sanjeev Jain, and Sudarshan Tiwari. Energy efficient clustering algorithms in wireless sensor networks : A survey. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 8(5) :259, 2011.
- [18] Ossama Younis and Sonia Fahmy. Heed : a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 3(4) :366–379, 2004.
- [19] Mao Ye, Chengfa Li, Guihai Chen, and Jie Wu. Eecs : an energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. In *PCCC 2005. 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, 2005.*, pages 535–540. IEEE, 2005.
- [20] Levente Buttyán and Péter Schaffer. Position-based aggregator node election in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 6(1) :679205, 2010.
- [21] Arash Ghorbannia Delavar, Somayeh Shamsi, Nafiseh Mirkazemi, and Javad Artin. Slgc : A new cluster routing algorithm in wireless sensor network for decrease energy consumption. *International journal of computer science, engineering and application*, 2(3) :39–51, 2012.
- [22] Stephanie Lindsey and Cauligi S Raghavendra. Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Proceedings, IEEE aerospace conference*, volume 3, pages 3–3. IEEE, 2002.
- [23] Sung-Min Jung, Young-Ju Han, and Tai-Myoung Chung. The concentric clustering scheme for efficient energy consumption in the pegasus. In *The 9th international conference on advanced communication technology*, volume 1, pages 260–265. IEEE, 2007.
- [24] John Von Neumann and Oskar Morgenstern. *Theory of games and economic behavior*, 2nd rev. 1947.
- [25] Michel Cavagnac and Jean-Jacques Gougnet. Talent sportif et équilibre compétitif-une approche par la théorie des jeux. *Revue Juridique et Économique du Sport*, (79) :7–31, 2006.
- [26] Z Han, D Niyato, W Saad, T Basar, and A Hjørungnes. *Game theory in wireless and communication networks : Theory, models and applications* 2011 cambridge.
- [27] E Rasmussen. *Jeux et information. Introduction à la théorie des jeux, Bruxelles, De Boeck Université, coll. «Ouvertures économiques*, 2001.
- [28] Fiona Carmichael. *A guide to game theory*. Pearson Education, 2005.
- [29] Robert E Kahn. The organization of computer resources into a packet radio network. In *Proceedings of the May 19-22, 1975, national computer conference and exposition*, pages 177–186, 1975.
- [30] Charles Perkins, Elizabeth Belding-Royer, and Samir Das. Rfc3561 : Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing, 2003.
- [31] Murat Yildizoglu. *Introduction à la théorie des jeux-2e édition : Manuel et exercices corrigés*. Dunod, 2011.
- [32] Jens Grossklags, Nicolas Christin, and John Chuang. Secure or insure ? a game-theoretic analysis of information security games. In *Proceedings of the 17th international conference on World Wide Web*, pages 209–218, 2008.

- [33] Rekha Menon, Allen B MacKenzie, R Michael Buehrer, and Jeffrey H Reed. Wsn15-4 : A game-theoretic framework for interference avoidance in ad hoc networks. In *IEEE Globecom 2006*, pages 1–6. IEEE, 2006.
- [34] Elizabeth M Belding-Royer. Hierarchical routing in ad hoc mobile networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2(5) :515–532, 2002.
- [35] Ting-Chao Hou and Tzu-Jane Tsai. A access-based clustering protocol for multihop wireless ad hoc networks. *IEEE journal on selected areas in communications*, 19(7) :1201–1210, 2001.
- [36] Ulas C Kozat, George Kondylis, Bo Ryu, and Mahesh K Marina. Virtual dynamic backbone for mobile ad hoc networks. In *ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No. 01CH37240)*, volume 1, pages 250–255. IEEE, 2001.
- [37] Wenli Chen, Nitin Jain, and Suresh Singh. Anmp : Ad hoc network management protocol. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 17(8) :1506–1531, 1999.
- [38] Jane Yang Yu and Peter Han Joo Chong. A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 7(1) :32–48, 2005.
- [39] Ching-Chuan Chiang, Hsiao-Kuang Wu, Winston Liu, and Mario Gerla. Routing in clustered multi-hop, mobile wireless networks with fading channel. In *proceedings of IEEE SICON*, volume 97, pages 197–211, 1997.
- [40] Sharmila J Francis and Elijah B Rajsingh. Performance analysis of clustering protocols in mobile ad hoc networks. *Journal of Computer Science*, 4(3) :192, 2008.
- [41] Dilip Kumar, Trilok C Aseri, and RB2009 Patel. Eehc : Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks. *computer communications*, 32(4) :662–667, 2009.
- [42] Ming Liu, Jiannong Cao, Guihai Chen, and Xiaomin Wang. An energy-aware routing protocol in wireless sensor networks. *Sensors*, 9(1) :445–462, 2009.
- [43] Dilip Kumar, Trilok C Aseri, and RB Patel. Multi-hop communication routing (mcr) protocol for heterogeneous wireless sensor networks. *International Journal of Information Technology, Communications and Convergence*, 1(2) :130–145, 2011.
- [44] Anthony Ephremides, Jeffrey E Wieselthier, and Dennis J Baker. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling. *Proceedings of the IEEE*, 75(1) :56–73, 1987.
- [45] Chunhung Richard Lin and Mario Gerla. Adaptive clustering for mobile wireless networks. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 15(7) :1265–1275, 1997.
- [46] Mainak Chatterjee, Sajal K Das, and Damla Turgut. Wca : A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks. *Cluster computing*, 5 :193–204, 2002.
- [47] Mark Yarvis, Nandakishore Kushalnagar, Harkirat Singh, Anand Rangarajan, York Liu, and Suresh Singh. Exploiting heterogeneity in sensor networks. In *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, volume 2, pages 878–890. IEEE, 2005.
- [48] Neeta Trivedi, G Elangovan, S Sitharama Iyengar, and Narayanaswamy Balakrishnan. A message-efficient, distributed clustering algorithm for wireless sensor and actor networks. In *2006 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pages 53–58. IEEE, 2006.
- [49] Gaurav Gupta and Mohamed Younis. Load-balanced clustering of wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03.*, volume 3, pages 1848–1852. IEEE, 2003.



- [50] Chor Ping Low, Can Fang, Jim Mee Ng, and Yew Hock Ang. Load-balanced clustering algorithms for wireless sensor networks. In *2007 IEEE International Conference on Communications*, pages 3485–3490. IEEE, 2007.
- [51] Zheng Zeng-Wei, Wu Zhao-Hui, and Lin Huai-Zhong. Clustering routing algorithm using game-theoretic techniques for wsns. In *2004 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, volume 4, pages IV–904. IEEE, 2004.
- [52] Afrand Agah, Sajal K Das, and Kalyan Basu. A game theory based approach for security in wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications, 2004*, pages 259–263. IEEE, 2004.
- [53] Deyu Lin and Quan Wang. An energy-efficient clustering algorithm combined game theory and dual-cluster-head mechanism for wsns. *IEEE Access*, 7 :49894–49905, 2019.
- [54] Nina Hendrarini, Muhamad Asvial, and Riri Fitri Sari. Optimization of heterogeneous sensor networks with clustering mechanism using game theory algorithm. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Software Engineering and Information Management*, pages 25–29, 2019.
- [55] Georgios Koltsidas and Fotini-Niovi Pavlidou. A game theoretical approach to clustering of ad-hoc and sensor networks. *Telecommunication Systems*, 47 :81–93, 2011.
- [56] Dongfeng Xie, Qi Sun, Qianwei Zhou, Yunzhou Qiu, and Xiaobing Yuan. An efficient clustering protocol for wireless sensor networks based on localized game theoretical approach. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(8) :476313, 2013.
- [57] Liu Yang, Yin-Zhi Lu, Yuan-Chang Zhong, Xue-Gang Wu, and Shao-Jing Xing. A hybrid, game theory based, and distributed clustering protocol for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 22 :1007–1021, 2016.
- [58] Wendi B Heinzelman, Anantha P Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 1(4) :660–670, 2002.

---

# *Résumé*

L'amélioration de la conservation d'énergie tout en maintenant une Qualité de Service (QoS) acceptable est une préoccupation fondamentale dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). nous proposons une approche novatrice basée sur la théorie des jeux pour améliorer le protocole LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) en intégrant des mécanismes de QoS afin de maximiser l'efficacité énergétique. Le protocole LEACH est couramment utilisé pour prolonger la durée de vie des RCSF en organisant les nœuds en clusters et en activant périodiquement des nœuds "cluster-heads" pour agréger et transmettre les données, nous introduisons un modèle basé sur la théorie des jeux où les nœuds capteurs agissent en tant que joueurs, prenant des décisions stratégiques pour devenir "cluster-heads" tout en optimisant la QoS globale du réseau. Les objectifs incluent la minimisation de la consommation d'énergie, la maximisation de la durée de vie du réseau et la garantie de niveaux de QoS spécifiques pour différentes applications. En utilisant des concepts de la théorie des jeux, tels que les équilibres de Nash et les jeux coopératifs, Cette proposition d'amélioration du protocole LEACH offre un cadre prometteur pour des RCSF plus économes en énergie, tout en maintenant des performances de QoS appropriées, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications critiques, notamment la surveillance environnementale et la santé mobile.

**Mots clés :** RCSF, QoS, Economie d'énergie, LEACH, Théorie des jeux.

## *Abstract*

Improving energy conservation while maintaining acceptable Quality of Service (QoS) is a fundamental concern in wireless sensor networks (WSNs). we propose an innovative approach based on game theory to improve the LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) protocol by integrating QoS mechanisms in order to maximize energy efficiency. The LEACH protocol is commonly used to extend the lifespan of RCSFs by organizing nodes into clusters and periodically activating cluster-heads to aggregate and transmit data. We introduce a model based on game theory where the Sensor nodes act as players, making strategic decisions to become "cluster-heads" while optimizing the overall QoS of the network. Goals include minimizing energy consumption, maximizing network lifetime, and ensuring specific QoS levels for different applications. Using concepts from game theory, such as Nash equilibria and cooperative games, This proposed improvement to the LEACH protocol offers a promising framework for more energy-efficient WSNs, while maintaining appropriate QoS performance, which is essential for many critical applications, including environmental monitoring and health mobile.

**key words :** WSNs, QoS, Energy Efficiency, LEACH, Game theory.