

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA DE BÉJAÏA  
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES  
DÉPARTEMENT DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE



## *Mémoire de Master*

En Recherche Opérationnelle

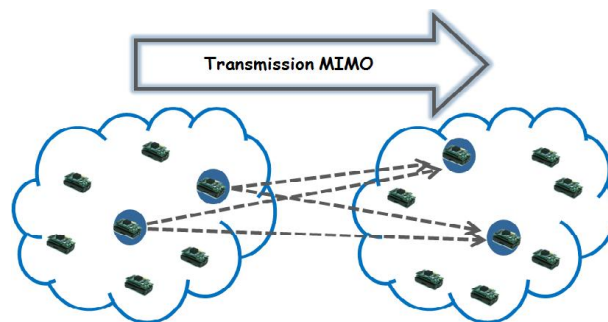
Option : Fiabilité et Evaluation des Performances des réseaux

*Thème :*

---

Stratégie MIMO coopérative pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

---



**Encadré par :**

Pr. AÏSSANI Djamil

M<sup>elle</sup> KHOULALENE Nadjjet

**Réalisé par :**

M<sup>elle</sup> BEDREDDINE Sabrina

M<sup>elle</sup> OUANTEUR Celia

**Devant le juré composé de :**

Président	M <sup>r</sup> BRAHMI	Belkacem	MCB	Université de Béjaïa
Examineurs	M <sup>r</sup> YAZID	Mohand	MAB	Université de Béjaïa
	M <sup>me</sup> HAKMI	Sedda	MAB	Université de Béjaïa

Promotion 2011/2012.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Réseaux de capteurs sans fils</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	3
1.2 Définitions	4
1.2.1 Définition d'un capteur	4
1.2.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fil	4
1.3 Architectures	4
1.3.1 Architecture d'un capteur sans fil	4
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs	6
1.3.3 Architecture protocolaire	6
1.4 Caractéristiques des RCSFs	8
1.5 Domaines d'application des RCSFs	10
1.5.1 Applications militaires	10
1.5.2 Applications de la surveillance	11
1.5.3 Applications environnementales	11
1.5.4 Applications médicales	11
1.5.5 La domotique	12
1.5.6 Domaine commercial	12
1.6 Facteurs de conception d'un réseau de capteurs sans fil	12
1.7 Approches de routage dans les RCSFs	15
1.7.1 Classification selon la structure du réseau	16
1.7.2 Classification selon les fonctions des protocoles	17
1.7.3 Classification selon l'établissement de la route	18
1.7.4 Classification selon l'initiateur de communication	19

1.8	Protocoles de routage hiérarchique . . . . .	19
1.8.1	Notion de réseau hiérarchique . . . . .	20
1.8.2	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) . . . . .	20
1.8.3	TEEN / APTEEN . . . . .	22
1.8.4	HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering) . . . . .	23
1.8.5	ANCAEE :A Novel Clustering Algorithm for Energy Efficiency in Wire- less Sensor Networks . . . . .	24
1.9	Conclusion . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Etat de l'art sur la technologie MIMO pour l'économie d'énergie dans les RCSFs</b>	<b>28</b>
2.1	Introduction . . . . .	28
2.2	La diversité . . . . .	29
2.3	Description de la technologie MIMO . . . . .	29
2.4	Stratégie MIMO coopérative proposée pour les RCSFs . . . . .	30
2.4.1	Optimisation énergétique des transmissions MIMO Coopératives pour les réseaux de capteurs sans fil. . . . .	30
2.4.2	Energy Efficiency of Coopérative MIMO with Data Aggregation in Wi- reless Sensor Networks . . . . .	32
2.4.3	Virtual MIMO-based coopérative communication for energy constrained Wireless Sensor Network . . . . .	33
2.5	Conclusion . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Files d'Attente</b>	<b>36</b>
3.1	Introduction . . . . .	36
3.2	Définition des files d'attente . . . . .	37
3.3	Notation de Kendall-Lee . . . . .	37
3.3.1	Processus des arrivées . . . . .	38
3.3.2	Processus de service . . . . .	39
3.3.3	Nombre de serveurs . . . . .	39
3.3.4	Disciplines du service . . . . .	40
3.4	Mesures de performances d'un système d'attente . . . . .	41
3.5	Files markoviennes . . . . .	41
3.5.1	La file $M/M/1$ . . . . .	42

3.5.2	La file $M/M/m$ . . . . .	43
3.5.3	La file $M/M/m/K$ . . . . .	44
3.5.4	La file $M/M/\infty$ . . . . .	45
3.6	Les réseaux de files d'attente . . . . .	46
3.6.1	Définition . . . . .	46
3.6.2	Réseaux exponentiels (Réseaux de Jackson) . . . . .	46
3.6.3	Les réseaux BCMP . . . . .	48
3.7	Conclusion . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Modélisation et évaluation des performances de ANCAEE - MIMO</b>	<b>50</b>
4.1	Introduction . . . . .	50
4.2	Motivation . . . . .	51
4.3	Proposition d'une stratégie MIMO coopérative pour les RCSFs. . . . .	52
4.3.1	Election des MCHs . . . . .	52
4.3.2	Formation des clusters . . . . .	53
4.3.3	Election du SCH . . . . .	53
4.3.4	Description de la communication "intra et inter" - clusters . . . . .	53
4.4	Description du système . . . . .	55
4.4.1	Modèle d'énergie . . . . .	55
4.4.2	Variables descriptives du système . . . . .	56
4.5	Choix du langage de programmation . . . . .	57
4.6	Le modèle mathématique . . . . .	57
4.7	Etapas de réalisation du simulateur . . . . .	58
4.8	Métriques de performances . . . . .	60
4.8.1	Interprétation des résultats de simulation . . . . .	61
4.9	Conclusion . . . . .	65
	<b>Conclusion générale</b>	<b>66</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>67</b>
	<b>Annexe</b>	<b>73</b>

# Remerciement

*L*ouange à Dieu le miséricordieux, sans lui rien de tout cela n'aurait pu être.

*En ouverture, avant toute considération subjective, nous tenons à remercier en premier lieu le Pr Djamil AÏSSANI, c'est un très grand honneur qu'il nous fait en acceptant de nous encadrer.*

*Au-delà de la formalité d'usage, nous tenons à exprimer toute notre gratitude envers M<sup>lle</sup> Nadjet KHOULALENE pour son encadrement, ses qualités tant scientifiques qu'humaines. Ce travail, nous le devons beaucoup à sa disponibilité permanente, sa rigueur scientifique et sa patience.*

*Nous aimerions aussi souligner la gentillesse particulièrement touchante de Dr Louiza BOUAL-LOUCHE, pour son orientation qui nous a beaucoup aidées.*

*Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail. M<sup>r</sup> B.Brahmi en tant que président, M<sup>r</sup> M.Yazid et M<sup>me</sup> S.Hakmi en tant que examinateurs.*

*Nous aimerions également remercier toutes nos familles, nos amis et collègues pour leur soutien et aide et qui nous ont données la force pour continuer.*

*Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail. Qu'ils trouvent tous ici l'expression de notre gratitude et notre parfaite considération.*

## Dédicaces

**J**<sup>E</sup> dédie ce modeste mémoire à :

*Mes chers parents pour leur soutien, leur aide et leur support tout au long de mes études.*

*Mon frère Ghiless et mes deux sœurs Lynda et l'adorable Rima(mimouche)*

*Mon cher mari M<sup>ed</sup> Seghir, un ange qui me fait oublier la fatigue et le stress, merci pour ton aide et ta patience que nul autre n'a fait autant.*

*Mes grands parents maternels Mama Kia et Vava Mohand qui m'ont toujours témoignée un soutien et un amour inestimable.*

*Mes beaux parents, Nana Malika et Ami Malek, mes beaux frères et mes belles sœurs.*

*Mes oncles : Nordine, Mouhoub, Hakim, Kamel, Hacene et Djamel ainsi que leurs familles qui m'ont apporté leurs soutiens.*

*Ma tante Fariza ainsi qu'a ses enfants Walid et Kami.*

*Mes cousins, cousines et mes amies : Fouzia, Sabrina, Hanane, Samia ....*

*Ma co-promotrice Mlle Khoualene .*

*Toute ma promotion Particulièrement A mon binôme Celia.*

**SABRINA**

## Dédicaces

**J**<sup>E</sup> dédie ce modeste mémoire à :

*Mes chers parents qui m'ont donnée gout aux études, soutenue, encouragée, et donnée la chance d'arriver à ce stade à mon jeune âge.*

*Mon petit frère Mohamed amine (moha) qui m'a beaucoup fait rire*

*Mon frère ange adoré Rayane de 8 ans avec ses conseils qui m'ont aidé.*

*Ma chère grand mère bien aimé Rachida.*

*Ma tante Malika, son mari et son fils wacim.*

*Mes cousins et cousines.*

*Mes amis Tina, Timo, Chouchou, Sara, Hakima, Makli et Lamine.*

*Ma co-promotrice Mlle Khoualene pour sa présence et sa gentillesse.*

*Toute ma promotion Particulièrement A mon binôme Sabrina et : Souad, Djidji, Sabrina, Hanane, Lilia, Foufou...*

**CELIA**

# Introduction générale

La Recherche Opérationnelle est née lors de la deuxième guerre mondiale. Ce domaine est caractérisée par des mots clés tels que : Modélisation, Simulation, et Optimisation. L'un des problèmes d'optimisation rencontrés récemment dans le domaine informatique est le problème "d'optimisation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil".

Ces derniers ont connu un succès fulgurant au sein des communautés scientifiques et industrielles. De nos jours, les capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles parfois même inaccessibles à l'homme. Une fois déployés, ils collectent, enregistrent, traitent toute sorte de grandeurs physiques. Cependant, ces appareils miniatures et autonomes possèdent des ressources limitées, notamment en énergie. De plus, leurs déploiement en milieu hostile rend difficile, voire impossible, toute intervention afin de recharger ou remplacer la batterie des capteurs. Il est donc impératif de mettre en place un protocole de routage efficace en énergie qui prenne en compte les contraintes imposées par ces réseaux. Cependant, lorsque le nombre de nœuds augmente le routage aura un impact négatif sur le réseau à cause de l'augmentation du nombre de messages circulant dans le réseau. Pour cela, les protocoles de routage pour les réseaux de capteurs à topologie hiérarchique ont été introduits, à titre d'exemple : LEACH [31], HEED [1] , ANCAEE [2]... etc. Ces protocoles permettent la réduction via une agrégation du nombre de messages transmis, réduisant ainsi la consommation d'énergie.

La consommation d'énergie est fortement liée aux trois principales tâches accomplies par un nœud et qui sont : la capture, le traitement de données et la communication. La transmission des données d'un capteur représente environ 70% de sa consommation d'énergie. C'est pour cela d'ailleurs que plusieurs autres techniques ont été établies dans la direction trans-



mission/réception cherchant à fournir de meilleurs gains énergétiques, telle que, la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Le premier système MIMO BLAST (Bell Labs Layered Space Time) [23] a été proposé par le laboratoire Bell en 1996 afin d'augmenter la capacité des systèmes de communication sans fil en utilisant plusieurs antennes à la fois en émission et en réception. Depuis les systèmes BLAST, Alamouti [7] a proposé en 1998 un système à diversité qui augmente la fiabilité de la transmission mais seulement pour deux antennes à l'émission. En 1999, Tarokh [34] a étendu le codage d'Alamouti pour un nombre arbitraire d'antennes.

L'objectif dans notre travail est la minimisation de la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil. A cet effet, nous avons proposé d'adapter la stratégie MIMO sur un protocole hiérarchique, qui consiste à regrouper les nœuds capteurs sous forme de clusters. Par la suite, nous nous sommes intéressé à la modélisation et à l'évaluation de performances de la communication "intra et inter" - clusters de notre proposition. A cet effet, nous avons fait appel à la théorie des files d'attente. Où nous avons fait varier la portée de transmission, la taille du paquet ainsi que le taux de service des capteurs pour voir leurs impacts sur l'énergie résiduelle du réseau.

Notre mémoire est structuré de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu général sur les réseaux de capteurs sans fil et passons en revue leurs principales caractéristiques et facteurs de conception, leurs domaines d'application, ainsi que quelques protocoles de routage hiérarchiques.
- Le deuxième chapitre comprend une synthèse bibliographique des travaux de la littérature sur la technologie MIMO.
- Le troisième chapitre comprend quelques généralités sur les files d'attente markoviennes  $M/M/1$ ,  $M/M/m$ ,  $M/M/m/K$ ,  $M/M/\infty$  et leurs caractéristiques, ainsi que la présentation des réseaux de files d'attente markoviens, à savoir, les réseaux de Jackson et BCMP.
- Le quatrième chapitre représente le coeur de notre travail. Nous l'avons consacré à une présentation de notre proposition **ANCAEE-MIMO** et à la modélisation de sa communication "intra et inter" - clusters par un réseau de files d'attente. Par la suite, nous avons présenté une analyse ainsi qu'une interprétation des performances de notre système.

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés, ainsi que des perspectives que nous souhaitons accomplir prochainement.

# 1

## Réseaux de capteurs sans fils

### 1.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à une miniaturisation du matériel informatique. Cette tendance à la miniaturisation a apporté une nouvelle technologie de réseaux informatiques présentant des défis importants. Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle ère de l'informatique embarquée et omniprésente. De très nombreux états de l'art ont été proposés [36].

Le présent chapitre consiste en une étude détaillée des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs), à savoir leurs utilités, architecture, les contraintes régissant sur de tels réseaux et ses domaines d'applications.

## 1.2 Définitions

### 1.2.1 Définition d'un capteur

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capable de traiter des informations et de les transmettre, via les ondes radio, à une autre entité (capteurs,..) sur une distance limitée à quelques mètres.



FIG. 1.1 – Capteur sans fils

### 1.2.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (WSNs<sup>1</sup>) sont un type particulier de réseau Ad-hoc [5], dans lesquels les nœuds sont des "*capteurs*". Ils se composent généralement d'un grand nombre de capteurs communicants entre eux via des liens radio pour le partage d'informations et le traitement coopératif. Dans ce type de réseau, les capteurs échangent des informations par exemple sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée, qui est rendue accessible à l'utilisateur externe par un ou plusieurs nœuds. Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via les autres capteurs de proche en proche à un "*point de collecte*", appelé station de base (ou, s'il s'agit d'un nœuds). Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via Internet ou par satellite.

## 1.3 Architectures

### 1.3.1 Architecture d'un capteur sans fil

Un "nœud capteur" contient quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Il existe des capteurs dotés d'autres composants additionnels : les systèmes de localisation tels que GPS (Global Position System) et un mobilisateur leur permettant le déplacement comme le montre la figure 1.2.

---

<sup>1</sup>Wireless Sensor Networks

### 1.3.1.1 L'unité de captage (Sensing unit)

Elle est composée de deux sous unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (Analog to Digital Converters) convertissant le signal de réception en signal électrique. Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

### 1.3.1.2 Unité de traitement (Processing unit)

Elle est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une autre pour l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur et d'une mémoire. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les stocke en mémoire ou les envoie à l'unité de transmission.

### 1.3.1.3 Unité de transmission (Transceiver unit)

Elle est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) pour assurer toutes les émissions et réceptions de données.

### 1.3.1.4 Unité de contrôle d'énergie (Power unit)

Elle est responsable de la gestion de l'énergie et de l'alimentation de tous les composants du capteur. Elle consiste, généralement, en une batterie qui est limitée et irremplaçable, ce qui rend l'énergie comme principale contrainte pour un capteur.

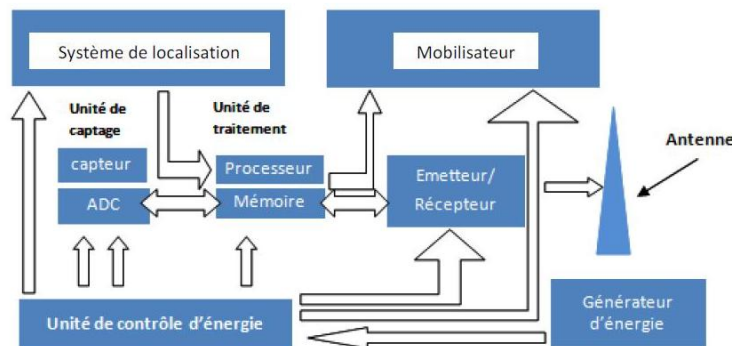


FIG. 1.2 – Architecture d'un nœud capteur

### 1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés en grand nombre dans un champ de capture " *sensor field*". Ils forment ainsi un réseau sans fil multi-sauts comme le montre la figure 1.3. Chaque nœud a pour mission la collecte des données et leurs routages vers le nœud de contrôle " *Sink* ". À son tour, le nœud de contrôle transmet les informations reçues à partir d'Internet ou par satellite à l'utilisateur final "task manager ".

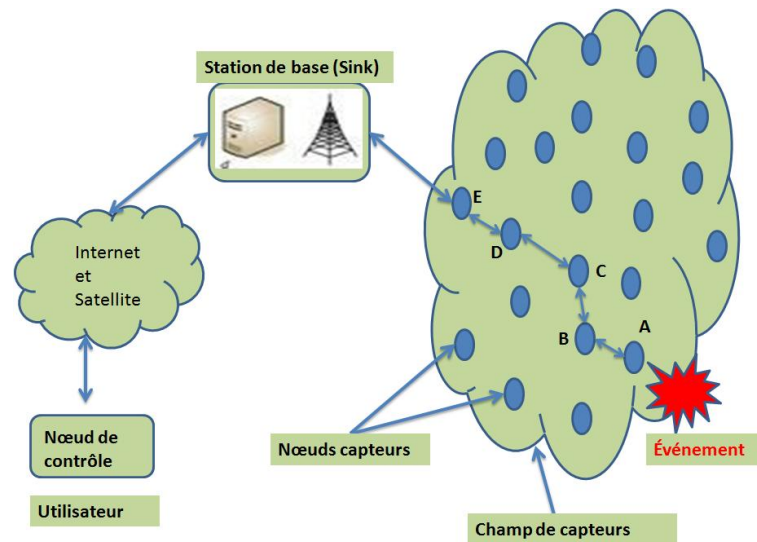


FIG. 1.3 – Architecture d'un réseau de capteurs.

Un exemple de réseaux de capteurs est fourni dans la Figure (1.3) : les capteurs sont déployés d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt, et une station de base, située à l'extrémité de cette zone, est chargée de récupérer les données collectées par les capteurs. Lorsqu'un capteur détecte un événement pertinent, un message d'alerte est envoyé à la station de base par le biais d'une communication entre les capteurs. Les données collectées sont traitées et analysées par des machines puissantes [11].

### 1.3.3 Architecture protocolaire

Contrairement aux réseaux traditionnels, les réseaux de capteurs utilisent une pile protocolaire de communication composée de cinq couches. Chaque couche va communiquer avec ses couches adjacentes en utilisant les services des couches inférieures et en fournissant les siens à celle de niveau supérieur. Aussi, cette pile comprend trois niveaux de gestion : le niveau de gestion des tâches, de la mobilité et d'énergie. La figure 1.4 donne un aperçu de la pile protocolaire dans les réseaux de capteurs [16].

- **Couche physique** : elle permet de moduler les données et les acheminer dans le media physique tout en choisissant les bonnes fréquences.
- **Couche liaison de données** : elle est responsable de l'accès au media physique et la détection ainsi que la correction des erreurs qui surviennent sur la couche physique. De plus, elle établit une communication saut par saut entre les nœuds.
- **Couche réseau** : elle s'occupe du routage de données fournies par la couche transport. Elle établit les routes entre les nœuds capteurs et le nœud puit et sélectionne le meilleur chemin en terme d'énergie, de délai de transmission et de débits ... etc.
- **Couche transport** : la couche transport vérifie le bon acheminement des données et la qualité de transmission et sert également à maintenir le flux de données en cas de nécessité dans les applications utilisées. Les principaux objectifs de cette couche sont [33] :
  - Multiplexer et démultiplexer les messages entre les applications et la couche réseau ;
  - Réaliser un contrôle de haut niveau sur les données.
- **Couche application** : elle assure l'interface avec les applications ainsi que l'agrégation de données et la synchronisation des nœuds. Il s'agit donc de la couche la plus proche des utilisateurs.

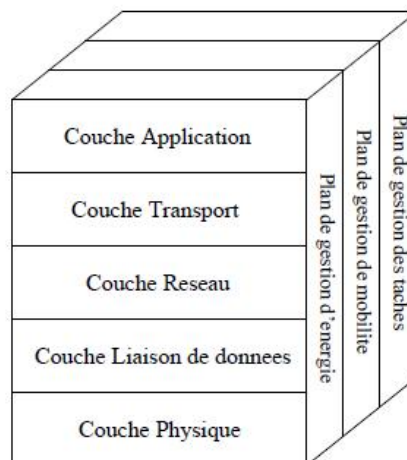


FIG. 1.4 – La pile protocolaire des réseaux de capteurs.

- **Plan de gestion d'énergie** : assure l'utilisation optimale de la ressource énergétique. Il s'occupe du contrôle du niveau d'énergie disponible dans le capteur, et assure des fonctionnalités telles que la mise en veille du capteur dans les moments d'inactivité, ou après envoi d'un message, afin de l'empêcher de le recevoir à nouveau. Il peut aussi se charger d'envoyer des messages aux voisins afin de les informer du niveau critique des batteries [8].
  - **Plan de gestion des tâches** : il se charge de la distribution équilibrée des tâches sur les différents nœuds. La nature du capteur et son niveau d'énergie sont les principaux paramètres pris en considération [10].
  - **Plan de gestion de mobilité** : détecte et enregistre le mouvement des nœuds capteurs afin de permettre à l'utilisateur de changer l'emplacement d'un nœud, l'auto-organisation des nœuds lors du changement de la topologie, etc.
- Le système de gestion de mobilité doit donc être capable de commander le nœud pour réaliser les mouvements nécessaires [10].

## 1.4 Caractéristiques des RCSFs

Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, un réseau de capteurs sans fil est un type particulier de réseaux ad-hoc. Néanmoins, La réalisation des réseaux de capteurs exige des techniques et des protocoles qui prennent en compte les spécificités et les exigences de ces réseaux, vu que les techniques conçues pour les réseaux ad hoc traditionnels, ne sont pas bien adaptées aux réseaux de capteurs. Pour illustrer ce point, les différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc sont décrits ci-dessous [5] :

- Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés en grand nombre,
- En tout moment, les capteurs peuvent être défaillants ou inhibés.
- La topologie des réseaux de capteurs change très fréquemment.
- Les réseaux de capteurs utilisent principalement le paradigme de communication broadcast tandis que les réseaux ad hoc sont basés sur le paradigme de communication point à point.
- Les capteurs sont limités en terme de capacité énergétique, calculatoire, et mémoriel.

Cependant, les RCSF ont des caractéristiques particulières, dont on cite :

- **Absence d'infrastructure** : les réseaux Ad-hoc en général, et les réseaux de capteurs en particulier se distinguent des autres réseaux par la propriété d'absence d'infrastructure

préexistante et de tout genre d'administration centralisée.

- **Taille importante** : un réseau de capteurs peut contenir des milliers de nœuds.
- **Interférences** : les liens radio ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence, ou utilisant des fréquences proches, peuvent interférer.
- **Topologie dynamique** : les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire, rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.
- **Sécurité physique limitée** : les réseaux de capteurs sans fil sont les plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.
- **Bande passante limitée** : une des contraintes primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un nœud est limitée.
- **Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul** : la caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la modestie de ses ressources énergétiques car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d'énergie (batterie). Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation des dépenses énergétiques est exigée au niveau de chaque nœud. Dû à la taille très petite de ce dernier, la capacité de stockage et la puissance de calcul sont également limitées dans un capteur [11].
- **Agrégation de donnée** : l'agrégation de données est très importante dans les réseaux de capteurs sans fil. La densité importante des nœuds peut causer des redondances de données dans le réseau. Un nœud dans le réseau peut recevoir la même donnée à partir de plusieurs nœuds. La transmission de la même donnée par plusieurs capteurs implique une perte d'énergie inutile. L'agrégation de données peut être réalisée en supprimant les paquets dupliqués ou en choisissant le maximum ou le minimum ou encore la moyenne des valeurs perçues.



## 1.5 Domaines d'application des RCSFs

Les RCSFs sont destinés à surveiller et à observer des phénomènes physiques comme : la température, l'humidité, la pression, le taux de bruit, le mouvement des véhicules et la vitesse [1.6]. Grâce à leurs performances élevées, les réseaux de capteurs ont pu envahir de multiples domaines. :

Parmi ces domaines où ces réseaux se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, nous citons [5] :

### 1.5.1 Applications militaires

Le faible coût, le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes sont des caractéristiques qui ont rendu les réseaux de capteurs efficaces pour les applications militaires. Plusieurs projets ont été lancés pour aider les unités militaires dans un champ de bataille et protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes. Le projet DSN [17] (Distributed Sensor Network) au DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) était l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisés les réseaux de capteurs pour rassembler des données distribuées. Les chercheurs du laboratoire national Lawrence Livermore ont mis en place le réseau WATS (Wide Area Tracking System) [22]. Ce réseau est composé de détecteurs des rayons gamma et des neutrons pour détecter et dépister les dispositifs nucléaires. Il est capable d'effectuer la surveillance constante d'une zone d'intérêt. Il utilise des techniques d'agrégation de données pour les rapporter à une station de base. Ces chercheurs ont mis en place ensuite un autre réseau appelé JBREWS (Joint Biological Remote Early Warning System) [14] pour avertir les troupes dans le champ de bataille des attaques biologiques possibles. Un réseau de capteurs peut être déployé dans un endroit stratégique ou hostile, afin de surveiller les mouvements des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection des armes chimiques, biologiques ou radiations) comme le montre la figure 1.5.

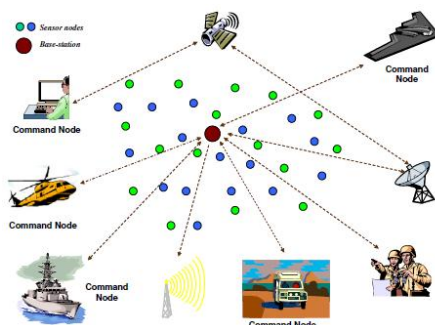


FIG. 1.5 – Application militaire des RCSFs

### **1.5.2 Applications de la surveillance**

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

### **1.5.3 Applications environnementales**

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par la suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même leur déploiement dans les sites industriels empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.). Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

### **1.5.4 Applications médicales**

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers, ...). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du cœur, ... à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, ...) chez les personnes dépendantes (handicapées ou âgées).



des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée une mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [4].

- **Tolérance aux pannes** : les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication (ce sont des produits de série bon marché, il peut donc y avoir des capteurs défectueux) ou plus fréquemment à un manque d'énergie. Les interactions externes (chocs, interférences) peuvent aussi être la cause des dysfonctionnements. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruption.
- **Coût de fabrication** : les nœuds sont des produits fabriqués en série. Il faut que le coût de fabrication de ces nœuds soit tel que le coût global du réseau ne soit pas supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier son intérêt.
- **Consommation d'énergie** : l'économie d'énergie est l'une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum leur énergie afin de pouvoir fonctionner. Les réseaux de capteurs fonctionnant selon un mode de routage par sauts, chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie du réseau et impose une réorganisation [36]. Les trois opérations intervenantes dans la consommation d'énergie sont [29] :
  1. **Capture** : les sources de consommation d'énergie dans les composants de captage peuvent être : l'échantillonnage des signaux, la conversion des signaux physiques en signaux électriques, le traitement des signaux et la conversion analogique numérique. L'énergie consommée pendant la phase de capture varie selon la nature de l'application. En effet, une capture à intervalles réguliers consomme moins d'énergie qu'une surveillance continue.
  2. **Communication** : cette communication est assurée dans la plus part des RCSFs par le support de transmission radio. La consommation d'énergie de ce dernier est affectée par plusieurs facteurs : le type du système de modulation, la quantité des données à communiquer, la puissance de transmission. Les radios consomment beaucoup plus

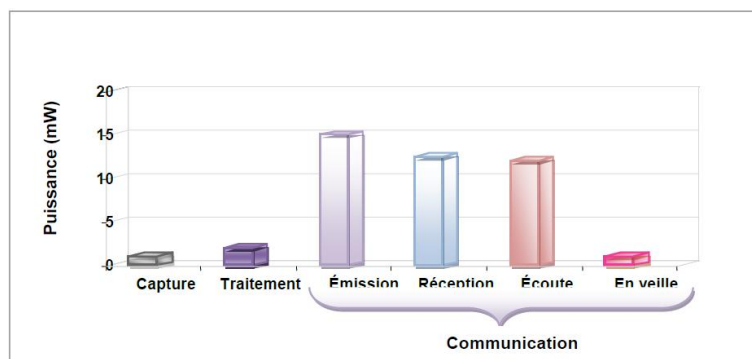


FIG. 1.7 – Consommation d’énergie en capture, traitement et transmission [46]

d’énergie dans les modes de transmission et de réception. En effectuant cette tâche de communication, le capteur peut fonctionner selon quatre modes : émission, réception, écoute ou mise en veille 1.7. L’optimisation de la consommation d’énergie liée à la communication est la plus importante dans les RCSFs.

3. **Traitement** : cette tâche inclut le contrôle des composants de capture et l’exécution des protocoles de communication et des algorithmes de traitement des signaux sur les données collectées. Elle est effectuée par les microprocesseurs. Cette phase consomme beaucoup moins d’énergie comparée à la phase de communication. Dans [27] les auteurs montrent que la quantité d’énergie requise pour la transmission de 1kb de données sur une portée de 100 mètres est approximativement égale à la quantité nécessaire pour exécuter 3 millions d’instructions avec une vitesse de 100 MIPS (Million of Instructions Per Second).
- **Topologie dynamique** : en raison de leur forte densité dans la zone à observer, il faut que les nœuds capteurs soient capables d’adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée. On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l’évolution d’un réseau :
    - ✓ *Déploiement* : les nœuds sont soit répartis de manière prédéfinie soit de manière aléatoire (lancés en masse depuis un avion). Il faut alors que ceux-ci s’organisent de manière autonome.
    - ✓ *Post-Déploiement* : après déploiement, la topologie du réseau peut subir des changements, qui peuvent être causés par :
      - La mobilité des nœuds : les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement.
      - La défaillance des nœuds : ceci peut être causé par un manque d’énergie, une défaillance

matérielle, une interférence environnementale, ou autre. Les nœuds défailants sont logiquement supprimés.

✓ *Redéploiement* : l'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie.

- ***Environnement*** : les nœuds capteurs sont souvent déployés dans des endroits éloignés et parfois inaccessibles (au fond des océans, champs de batailles, . . . etc). Un RCSF doit donc assurer leur résistance à des conditions dures, et sans surveillance.
- ***Media de transport*** : le média de communication établi entre les nœuds, peut être de type radiofréquence ou infrarouge. Cependant, le type radiofréquence est préféré au média optique ou encore à l'infrarouge, grâce à sa facilité d'installation.

## 1.7 Approches de routage dans les RCSFs

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont déployés d'une manière dense dans un champ de captage. Pour permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage spéciaux basés sur la communication multi-saut sont nécessaires entre les nœuds capteurs et le nœud puit du réseau. Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Ces approche peuvent être distinguées suivant : la structure du réseau (topologie du réseau), les fonctions des protocoles, l'établissement des routes et l'initiateur de la communication [1.8](#).

La figure suivante montre la classification des différentes approches de routage dans les RCSFs selon les critères cités précédemment :

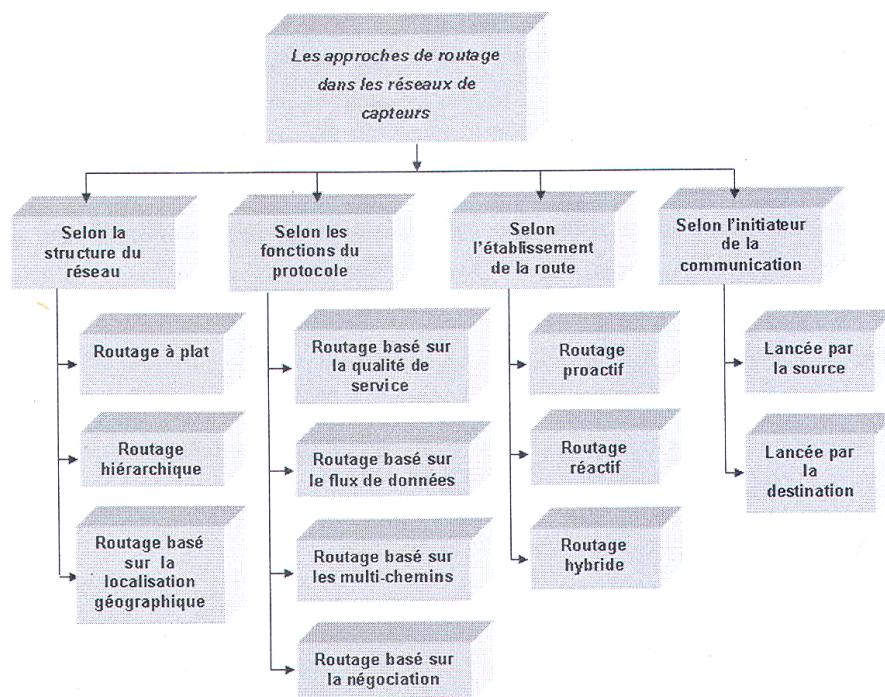


FIG. 1.8 – Les approches de routage dans les réseaux de capteurs

## 1.7.1 Classification selon la structure du réseau

Les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories : protocoles à plat (Flat based routing), protocoles hiérarchiques (Hierarchic based routing/Clustering based routing) et les protocoles basés sur la localisation géographique (Location based routing).

### 1.7.1.1 Routage à plat

La première catégorie des protocoles de routage est celle des protocoles de routage à plat multi-sauts (multi-hop flat routing) dont les protocoles sont basés sur le principe centrés données "data centric" où tous les nœuds ont le même rôle et ils collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage.

En raison du grand nombre de tels nœuds, il n'est pas faisable d'affecter un identificateur global à chaque nœud. Pour pallier cette lacune, un système de dénomination par attribut (attribute values) est nécessaire pour spécifier les propriétés des données [13][38].



### 1.7.1.2 Routage hiérarchique

Les protocoles de routage hiérarchiques sont chargés généralement d'établir des cluster-heads et de définir la manière dont laquelle les nœuds décident quel cluster-head à joindre.

Le but principal du routage hiérarchique est de maintenir l'efficacité de consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans la communication multi-sauts avec un cluster particulier et en performant l'agrégation des données afin de diminuer le nombre de messages à transmettre à la destination. La formation des clusters est typiquement basée sur l'énergie réservée dans les nœuds capteurs et de la proximité de ceux-ci au cluster-head [32].

### 1.7.1.3 Routage basé sur la localisation géographique

La plupart des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessitent la localisation des nœuds capteurs. En générale, ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée. Puisqu'il n'y a aucun système d'adressage pour les nœuds dans les réseaux de capteurs (comme les adresses IP) et comme ils sont déployés dans une région d'une manière aléatoire, l'information de localisation de ces nœuds peut être utilisée dans le routage des données d'une manière efficace en terme d'énergie. Par exemple, si la région à sentir est connue (en utilisant la localisation des nœuds capteurs) les requêtes seront alors envoyées seulement à cette région particulière, ainsi le nombre de transmission sera réduit de manière significative [52].

## 1.7.2 Classification selon les fonctions des protocoles

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (Quality of Service "QoS" based routing), routage basé sur le flux de données dans le réseau (Network Flow based routing), routage basé sur des multi-chemins (Multi-path based routing), et routage basé sur la négociation (Negotiation based routing).

### 1.7.2.1 Routage basé sur la QoS

Dans les protocoles de routage basé sur la QoS, le réseau doit s'équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire une certaine



métrique de QoS, par exemple : largeur de la bande passante [52].

### **1.7.2.2 Routage basé sur le flux de données dans le réseau**

Dans cette approche, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flux représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents nœuds [49].

### **1.7.2.3 Routage basé sur multi-chemins**

Les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination quand le chemin primaire soit défaillant. Ces chemins alternatifs sont maintenus par l'envoi périodique des messages. Par conséquent, la fiabilité du réseau peut être augmentée en maintenant les chemins alternatifs les plus récents [3].

### **1.7.2.4 Routage basé sur la négociation**

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communications en se basant sur les ressources disponibles [30].

## **1.7.3 Classification selon l'établissement de la route**

Suivant la manière de création et de maintenance de route lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs, et les protocoles hybrides.

### **1.7.3.1 Protocoles proactifs**

Les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau [40].

### 1.7.3.2 Protocoles réactifs

Les protocoles réactifs (protocoles de routage à la demande) créent et maintiennent des routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route est lancée [40].

### 1.7.3.3 Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le prochain voisinage (voisinage à deux ou trois sauts), au-delà de la zone de voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.

## 1.7.4 Classification selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut être lancée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires.

### 1.7.4.1 Communication lancée par la source

Dans ce type de protocole, les nœuds envoient des données à la destination quand ils les capturent, ce qui signifie que les données sont envoyées à certaines intervalles ou quand les nœuds capturent certains événements [3].

### 1.7.4.2 Communication lancée par la destination

Les protocoles de communication lancée par la destination, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination ou un autre nœud différent. C'est-à-dire propager les requêtes à tous les nœuds d'une région topologique et attendre la réception des données du nœud capteur concerné dans cette région [15]

## 1.8 Protocoles de routage hiérarchique

Lors de l'étude du problème de routage, beaucoup de contraintes doivent être prises en compte. En effet, lorsque le nombre de nœuds déployés augmente, le problème devient plus

complexe. Les protocoles de routage à plats fonctionnent bien quand le réseau ne comprend pas un grand nombre de nœuds mais lorsque le réseau devient plus important, ces protocoles n'assurent plus un bon fonctionnement du réseau. Afin d'augmenter la scalabilité du réseau, les topologies hiérarchiques ont été introduites. Ces dernières se basent sur le partitionnement du réseau en sous-ensembles facilitant ainsi la gestion du réseau et assurant une meilleure gestion des ressources énergétiques.

### 1.8.1 Notion de réseau hiérarchique

Un réseau hiérarchique se base sur le concept nœud-standard/ nœud-maître, où les nœuds standard acheminent leurs messages à leurs maître, lequel les achemine ensuite jusqu'à la station de base (sink). Les topologies hiérarchiques ont été introduites en répartissant les nœuds sur plusieurs niveaux de responsabilité et la tâche de routage est confiée à certains nœuds appelés 'nœuds-maîtres'. Les nœuds-maîtres peuvent être des super-nœuds (des nœuds plus puissants comparés aux nœuds simples, i.e. possédant des ressources plus importantes) ou similaires aux nœuds-standard élus périodiquement suivant leur niveau d'énergie résiduelle. Dans les topologies hiérarchiques, lors du routage des paquets, une agrégation des données peut être effectuée par les nœuds-maîtres. Ceci permet de diminuer le nombre de messages circulant dans le réseau, impliquant ainsi une réduction de la consommation d'énergie. Exemple sans agrégation : Au

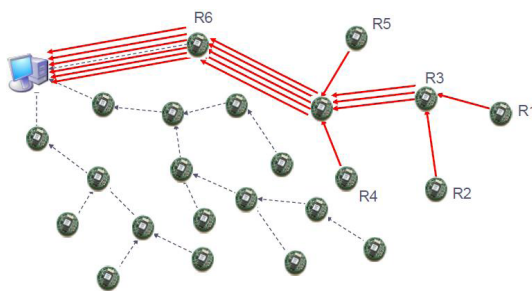


FIG. 1.9 – Routage sans agrégation

total, 18 messages sont envoyés sur le réseau de capteurs. En utilisant le mécanisme d'agrégation de données, on obtient un total de 7 messages envoyés sur le réseau :

### 1.8.2 Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

LEACH [31] est l'un des premiers protocoles de routage hiérarchiques proposés pour les réseaux de capteurs. Ce protocole utilise un clustering distribué (la formation des clusters et l'élection des cluster-heads se font au niveau des nœuds). LEACH suppose que les nœuds sont

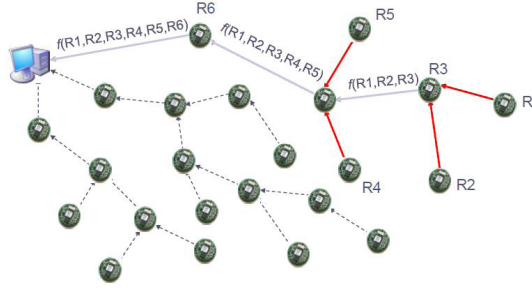


FIG. 1.10 – Routage avec agrégation

homogènes et que l'acheminement des paquets vers la station de base se fait en un seul saut via les cluster-heads. Les nœuds ont la possibilité de devenir cluster-heads en se basant sur des probabilités d'élection. LEACH s'exécute en périodes, comportant chacune quatre phases qui sont :

1. **Phase des annonces** : c'est la phase où les clusters sont formés et les cluster-heads sont élus pour une période déterminée. Cette élection se fait d'une manière cyclique dans le but d'équilibrer la dissipation d'énergie. Durant cette étape, chaque nœud  $N$  choisit aléatoirement un nombre dans l'intervalle  $[0,1]$ , si ce nombre est inférieur à un seuil  $T(N)$  alors le nœud est élu cluster-head.  $T(N)$  est défini comme suit :

$$T(i) = \begin{cases} \frac{p}{1-p^{*(r \bmod \frac{1}{p})}} & \text{si } i \in G \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (1.1)$$

où :

- $p$  : pourcentage de CHs désiré dans la population du capteur.
- $r$  : la période au cours de laquelle un nœud a pris le rôle de CH.
- $G$  : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élus comme CHs lors des  $1/P$  périodes précédentes.

Dès que les cluster-heads sont élus, chacun d'eux envoie un message de notification aux autres nœuds du réseau. Ces nœuds décident alors de leur appartenance à un cluster selon l'amplitude du signal reçu en choisissant le signal le plus fort.

2. **Phase de création des clusters** : une fois la décision prise, chaque nœud doit informer son cluster-head de son choix par l'envoi d'un paquet d'affiliation.
3. **Phase de création de l'ordonnancement** : chaque cluster-head ayant reçu les messages des nœuds désirant appartenir à son cluster, diffuse un ordonnancement TDMA aux membres de son cluster en attribuant à chaque membre un intervalle de temps durant lequel il pourra communiquer ses données.

4. **Phase de transmission des données** : après l'établissement de l'ordonnancement, les membres communiquent et transmettent les données vers leurs cluster-heads (CHs) en un seul saut durant les slots qui leur ont été affectés. Les CHs agrègent les données reçues et les transmettent vers la station de base. Le réseau réitère ensuite les quatre phases précédentes dans de nouvelles périodes.

●**Avantages**

- L'auto-configuration des clusters se fait indépendamment de la station de base (algorithme distribué).
- Les données sont fusionnées pour réduire la quantité d'informations transmises vers la station de base.
- La consommation d'énergie est partagée sur l'ensemble des nœuds prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

●**Inconvénients**

- Le pourcentage désiré est choisi manuellement sans justification.
- L'élection du CH est réalisée par une méthode probabiliste. En effet, il y a une forte chance qu'un nœud ayant de faibles capacités d'énergie devienne CH. Lorsque ce dernier meurt, c'est tout le cluster qui devient dysfonctionnel.
- Le CH est supposé avoir une large portée de communication afin que les données puissent atteindre la station de base en un saut. Ceci n'est pas toujours une hypothèse réaliste ; les CHs sont des capteurs ordinaires et la station de base n'est souvent pas directement accessible par tous les nœuds à cause des problèmes de propagation du signal, par exemple, en raison de la présence d'obstacles.
- Aucune suggestion n'est faite à propos du temps de réélection des CHs (temps des périodes).
- Les CHs les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station.

### 1.8.3 TEEN / APTEEN

**TEEN** (Threshold sensitive Energy Efficient Network protocol) [42] est un protocole qui se base sur un clustering à plusieurs niveaux, contrairement à LEACH, TEEN suit le modèle "event-driven" et n'utilise pas d'ordonnancement TDMA. Les transmissions dépendent des valeurs suivantes déterminées par l'utilisateur : HT (Hard Threshold) et ST (Soft Threshold). Le principe adopté est le suivant : si la valeur mesurée dépasse HT, le nœud envoie les données

au cluster-head. Si la prochaine valeur captée est supérieure ou égale à HT, le nœud ne transmet ultérieurement que si cette valeur change avec un pas supérieur ou égal à ST. Ceci permet donc de limiter le nombre de messages émis. Cependant, TEEN suit un comportement réactif et ne fournit pas les données périodiquement.

**APTEEN** (Adaptive Periodic TEEN) [41] est une extension de TEEN qui vise à l'adapter pour la surveillance périodique, en plus du mode de captage réactif. Le modèle d'architecture adopté par APTEEN est similaire à TEEN, et les seuils HT et ST sont utilisés. Cependant, APTEEN oblige le nœud à capter et à transmettre les données au cluster-head après un délai appelé 'count time'. Pour cela, un slot de temps est associé à chaque membre du groupe suivant un ordonnancement TDMA pour lui permettre de transmettre [37].

TEEN est jugé plus performant en termes de consommation d'énergie. Cependant, APTEEN fusionne les approches proactives et réactives pour plus d'efficacité et il est donc plus pratique que TEEN.

#### 1.8.4 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)

HEED [1] sélectionne les cluster-heads selon un critère hybride regroupant le coût d'énergie et un autre paramètre tel que le degré des nœuds, il ne sélectionne pas les nœuds CHs au hasard. Seuls les capteurs qui ont une haute énergie résiduelle peuvent devenir des clusters-head. HEED a les caractéristiques suivantes :

- La consommation d'énergie n'est pas supposé être uniforme pour tous les nœuds.
- Pour une portée de transmission d'un capteur donnée, la probabilité de sélection CH peut être ajusté pour assurer l'inter-connectivité CH (la possibilité de modifier leur puissance de transmission).

En HEED, chaque nœud est associé à un seul cluster et peut communiquer directement avec son CH. L'algorithme est divisé en trois phases :

- **Phase d'initialisation** : l'algorithme définit d'abord un pourcentage initial (pourcentage désiré) de CHS entre tous les capteurs. Cette valeur de pourcentage,  $C_{prob}$ , est utilisé pour limiter les annonces CH initiale à d'autres capteurs. Chaque nœud capteur est élu comme cluster-head avec une probabilité,  $CH_{prob}$ , comme suit :

$$CH_{prob} = C_{prob} * \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (1.2)$$

où :  $E_{residual}$ , est l'énergie actuelle dans le capteur et  $E_{max}$  est l'énergie maximale, ce qui correspond à une batterie entièrement chargée.  $CH_{prob}$  n'est pas autorisé à descendre en dessous d'un certain seuil  $p_{min}$  (afin d'éviter un nombre d'itérations infini).

- **phase de répétition** : durant cette phase, chaque capteur passe par plusieurs itérations jusqu'à ce qu'il trouve le CH dont il pourrait transmettre avec un coût minimale (la puissance de transmission). Si un capteur n'entend pas de CH, il choisit d'être lui-même un CH et envoie un message d'annonce à ses voisins pour les informer sur le changement de statuts. Enfin, chaque capteur double la valeur  $CH_{prob}$  et passe à la prochaine itération de cette phase. L'exécution de cette phase s'arrête lorsque son  $CH_{prob}$  atteint 1 (où le capteur est garanti d'être élu comme CH).
- **Phase de finalisation** : durant cette phase, chaque capteur prend une décision finale sur son statu. Il choisit soit le CH à moindre coût ou se prononce comme CH.

#### •Avantage

- HEED prolonge la durée de vie du réseau en distribuant l'énergie de la communication et le nombre de CHs d'une façon uniforme.
- Son processus d'itérations est indépendant de la topologie ou de la taille du réseau.
- HEED n'indique aucune supposition sur la distribution ou la densité des nœuds ainsi que leurs capacités.

#### •Inconvénients

- Les clusters générés avec HEED ne sont pas forcément équilibré en taille.
- Le fait, que le choix des CHs est une décision qui ne se base que sur des informations locales, des insuffisances dans la fonction du coût seront présentées telle le cas de la communication inter-clusters qui n'est pas prise en considération par cette fonction.

### 1.8.5 ANCAEE :A Novel Clustering Algorithm for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks

Le protocole ANCAEE [2], est un protocole de routage hiérarchique performant en terme de minimisation de la consommation énergétique, utilisant une nouvelle méthode pour l'élection des CHs basé sur l'énergie résiduelle tout en assurant une communication intra-cluster à un-saut et une communication inter-clusters multi sauts.

#### ✓ Algorithme d'élection des CHs

Afin qu'un nœud devienne un CH, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- Tous les nœuds ont la même énergie initiale.
- Il y a S nœuds dans le champ de capture.
- Tous les nœuds commencent le processus de clustering dans un état "Indécis".

On a assigné à chaque nœud un identifiant unique  $i$ , pour  $i=1\dots S$ .

A l'origine, tous les nœuds sont semblables, c.à.d., il n'y a pas de CH dans chaque cluster.

Initialement, la sélection des CHs se fait d'une manière aleatoire. Lorsqu'un CH atteint un seuil prédéterminé (20% de l'énergie initiale), un nœud  $q$  est choisi parmi les nœuds de son clusters et devient le nouveau CH et vérifie simultanément les deux conditions suivantes :

- le nœud capteur n'a pas déjà été élu CH précédemment.
- l'énergie résiduelle d'un nœud capteur est supérieure à la moyenne d'énergie de tous les nœuds capteurs du cluster.

Ainsi, la probabilité qu'un nœud devienne le nouveau CH est donnée par :

$$P_i = \frac{E_{rem}(i) * k}{E_{arg}(i) * M_i} \quad (1.3)$$

Où :

- $E_{rem}$  : est l'énergie résiduelle du nœud  $i$ .
- $E_{arg}$  : est l'énergie moyenne de tous les nœuds d'un cluster.

lorsqu'un nœud devient CH, il se change en état "Décidé" ainsi que ses voisins. l'algorithme s'arrête lorsque tout les nœuds seront dans un état "Décidé" (soit devenu CH ou voisin du CH). Sur la base de ces résultats, le nombre moyen des nœuds capteurs dans chaque cluster est  $M$  où :

$$M = \frac{S}{K} \quad (1.4)$$

où  $K$  est le nombre de clusters formé.

### ✓ Formation des clusters

La prochaine étape dans la phase de clusterisation est la formation de clusters, une fois les CHs élus, ce qui suit va donner une description de la formation des nouveaux clusters :

**Etape 1 :** Le nouveau CH élu comme ci-dessus, il diffuse un message d'annonce advertisements (ADV) à tous les nœuds non-cluster (n'appartenant pas à un cluster) en utilisant le protocole Carrier Sense Multiple Access (CSMA) MAC.

**Etape 2 :** Chaque nœud capteur détermine quels clusters à joindre, en choisissant le CH qui requière un minimum d'énergie de communication.

**Etape 3 :** Chaque nœud non-cluster utilise CSMA pour envoyer le message à des CHs en les informant sur le cluster dont il veut appartenir

**Etape 4 :** Une fois que les CHs ont reçus des messages par tous les nœuds, une table d'ordonancement , Time Division Multiple Access (TDMA) sera créée et l'envoi ainsi à tous



les nœuds, Ce message contient le temps alloué pour chaque nœud de transmettre au CH dans son cluster.

**Etape 5 :** chaque nœud capteur utilise le TDMA qui lui est attribué pour transmettre des données au CH avec une transmission à un saut et met en veille (éteint) son transmetteur à chaque fois que la distance entre le nœud et le CH est plus d'un saut pour économiser l'énergie. Pour éviter qu'un seul nœud transmette les données plusieurs fois en une itération, une valeur seuil  $G$  a été fixée.  $G$  est la durée totale de tous les nœuds du cluster transmettant leurs données au CH en une seule itération.

**Etape 6 :** les CHs émettront des nouveaux slots TDMA à tous les nœuds de leurs clusters lorsque le temps alloué pour  $G$  s'est écoulé, pour chaque nœud la connaissance exacte de son temps de transmission de données évite les collisions de celles-ci qui peut augmenter la consommation d'énergie.

**Etape 7 :** CH émetteur-récepteur est toujours actif pour recevoir les données de chaque nœud dans son cluster et de les préparer à la transmission inter-clusters.

#### ✓ Phase de communication

Après que toutes les données ont été reçues, le CH agrège les données et les transmet à la SB par sauts multiples.

## 1.9 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement, . . . etc. Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication, la pile protocolaire des capteurs, leurs diverses applications ainsi que quelques protocoles de routage hiérarchique. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux. En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de sa consommation dans ce type de réseaux une tâche critique pour prolonger sa durée de vie. C'est pour cela d'ailleurs que plusieurs travaux ont été établis dans la direction d'émetteur/récepteur cherchant à fournir de meilleurs gains énergétiques. Plusieurs techniques de transmission existent tel que : SISO (Single Input Single Output), SIMO (Single Input Multiple Output), MISO (Multiple Input Single Output) et MIMO (Multiple Input Multiple Output). Il s'avère que la

technique MIMO fournit un meilleur gain énergétique.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter un état d'art sur les différentes stratégies MIMO coopératives proposées pour les RCSFs afin de minimiser la consommation énergétique.

# 2

## Etat de l'art sur la technologie MIMO pour l'économie d'énergie dans les RCSFs

### 2.1 Introduction

Cela fait maintenant plus de deux siècles que les communications évoluent pour répondre à un besoin de plus en plus important en terme de distance entre l'émetteur et le récepteur. Très vite dans l'histoire des radiocommunications, des éléments rayonnants directifs ont été utilisés pour concentrer l'énergie dans la direction de l'émetteur/récepteur permettant ainsi d'abaisser la puissance d'émission et par là-même de minimiser l'impact des interférences. Par la suite, ces antennes directives ont été remplacées par des réseaux d'antennes adaptatives (antennes intelligentes).

L'utilisation des réseaux d'antennes en émission ou en réception sont appelées MISO (Multiple Input Single Output), respectivement SIMO (Single Input Multiple Output) par rapport au système classique de transmission avec une antenne en émission et en réception SISO (Single Input Single Output) [26].

Intuitivement, l'approche la plus complexe consiste à utiliser des réseaux d'antennes en émission et en réception en même temps, d'où le nom MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Dans ce chapitre, nous allons présenter une description de quelques stratégies MIMO coopératives proposées pour les RCSFs.

## 2.2 La diversité

La diversité consiste à transmettre des répliques de l'information indépendamment en utilisant plusieurs signaux en même temps sur différent trajets, il existe deux types :

- **Diversité à l'émission** pour garantir la diversité en absence de CSI (Channel State Information).
- **Diversité à la réception** pour avoir une variabilité d'amplitude plus faible.

Notons que la diversité d'émission est plus compliquée, car elle nécessite l'estimation du canal avant la transmission, alors que la diversité de réception peut se faire a posteriori.

## 2.3 Description de la technologie MIMO

Le MIMO permet d'envoyer plusieurs signaux différents sur des antennes différentes à des fréquences proches pour augmenter le débit ou la portée du réseau. Sa particularité réside donc dans l'utilisation simultanée de plusieurs antennes, émettrices et réceptrices. Ainsi, il permet d'améliorer les performances des appareils, qui aujourd'hui connaissent des problèmes liés à la nature des ondes et à leur comportement suivant l'environnement, ce qui diminue la qualité de transmission et donc le débit ainsi que la portée.

Les systèmes MIMO présentent un vaste champ d'étude. Dans la littérature, ces systèmes, pouvant exploiter la diversité, qui fait l'objet de nombreux travaux dans le but d'améliorer la qualité de la transmission à travers les canaux radio.

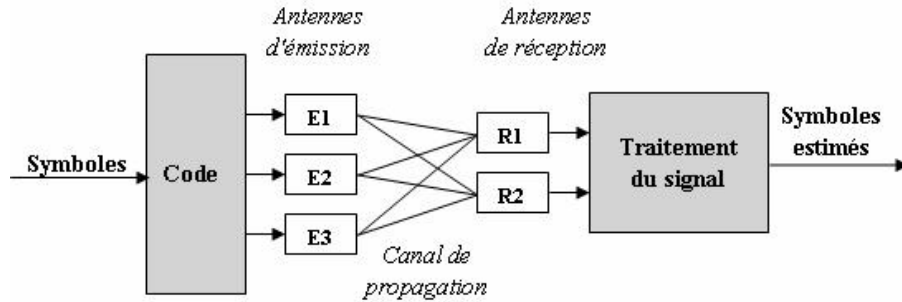


FIG. 2.1 – Illustration d'un système MIMO à 3 émetteurs et 2 récepteurs

L'efficacité énergétique des transmissions MIMO est particulièrement utile pour les réseaux de capteurs sans fil où chaque nœud doit fonctionner sans échange ou recharge de batterie pendant très longtemps et où la consommation d'énergie est la contrainte la plus importante.

## 2.4 Stratégie MIMO coopérative proposée pour les RCSFs

Nous allons dans ce qui suit vous présenter quelques stratégies MIMO coopératives proposées pour les RCSFs :

### 2.4.1 Optimisation énergétique des transmissions MIMO Coopératives pour les réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce travail [45], les auteurs montrent l'efficacité énergétique de transmission MIMO (Multiple input Multiple Output) pour les réseaux de capteurs sans fil par rapport au transmission SISO (Single Input Single Output). Les systèmes utilisant des antennes multiples tant à l'émission qu'à la réception (MIMO) nécessitent moins d'énergie que le système mono-antenne (SISO), pour une transmission au même taux d'erreur binaire TEB [43].

Autrement dit, au lieu d'utiliser une transmission d'information SISO, directe d'une source vers une destination, sur une distance précise  $d$ , ce qui n'est pas efficace pour de longue distance, un système MIMO coopératif peut être créé dans le but d'économiser l'énergie de transmission. Des techniques MIMO, utilisant des codes spatio temporels en bloc STBC (Space Time Bloc Codes) [39] ... etc, sont employées pour envoyer simultanément les données au destinataire tout comme dans un système MIMO classique (chaque nœud coopérant joue le rôle d'une antenne). Parmi les techniques multi-antennes les STBS sont sans doute les plus appropriés au contexte des réseaux de capteurs [18].

A la réception, les voisins coopérant reçoivent le signal **MIMO** modulé et retransmettent leurs informations respectivement jusqu'au destinataire.

L'énergie supplémentaire demandé par l'échange local de données en vue de la coopération, dépend du nombre d'émetteurs  $N_t$  qui coopèrent et la distance  $d_m$  entre deux de ces éléments.

1. Etape de l'émission :

Le nœud  $S$  doit d'abord diffuser ses  $N_b$  bits d'informations aux nœuds  $N_{t-1}$ , autres nœuds coopérant.

Après avoir reçu  $N_b$  bits du nœud  $S$  les  $N_t$  émetteurs coopérant vont coder et moduler leurs bits en symbole (**STBC** [39]) et envoyer l'information.

L'énergie par bit consommée lors d'une transmission locale est noté :  $E_{pbcoopTx}$  pour ( $d_m = d$  et  $N_{t-1}$ ).

La consommation supplémentaire d'énergie à l'émission  $E_{coopTx}$  dépend de la consommation par bit  $E_{pbcoopTx}$  et peut être calculé comme suit :

$$E_{coopTx} = N_b * E_{pbcoopTx} \quad (2.1)$$

2. Etape de réception :

Les  $N_{r-1}$  récepteurs coopérants vont recevoir cette information **MIMO** modulée, quantifiée en symbole (**STBC** [39]) en  $N_{sb}$  et retransmettre ces derniers jusqu'à  $D$  (nœud de destination).

La consommation supplémentaire d'énergie en réception  $E_{coopRx}$  dépend de  $N_r$  (nœuds récepteurs coopérant), de  $N_{sb}$ , et de la consommation d'énergie par bit SISO  $E_{pbcoopRx}$ .

$$E_{coopRx} = N_{sb} * (N_{r-1}) * N_b * E_{pbcoopRx} \quad (2.2)$$

– Evaluation de performances

Transmettre  $10^7$  bits avec un taux d'erreur TEB de  $10^{-5}$  d'une source  $S$  vers une destination  $D$  séparé d'une distance  $d$ , sachant que la distance locale entre nœuds coopérants est de  $d_m = 5m$ . Sur la base de toutes ces données, une simulation a été faite et a montré que :

- ◇ Les techniques multi-antennes coopératives peuvent procurer un gain en énergie très intéressant dans le domaine des réseaux de capteurs.
- ◇ Les transmissions MIMO et MISO sont plus efficaces pour de longues distances que les transmissions SISO.

- ◊ En choisissant le meilleur ensemble  $(N_t-N_r)$  (nombre d'émetteurs, Nombre de récepteurs), il sera possible d'optimiser la consommation énergétique en fonction de la distance.
- ◊ L'introduction de l'approche **MIMO** coopérative multi-sauts (2-2) s'avère très intéressante pour des réseaux dont la densité n'est pas homogène.

Néanmoins, l'approche **MIMO** coopérative étant plus sensible aux erreurs d'estimation du canal, pour ceci, des études sont actuellement en cours afin de déterminer la dégradation des performances dues à ces imprécisions.

## 2.4.2 Energy Efficiency of Coopérative MIMO with Data Aggregation in Wireless Sensor Networks

Un modèle d'énergie pour les réseaux de capteurs a été proposé dans [24], basé sur la technique MIMO coopérative, en tenant compte de l'énergie de transmission ainsi que l'énergie d'agrégation des données. L'approche MIMO et l'approche SISO ont été comparé.

Pour l'approche MIMO, quatre parties de la consommation d'énergie sont considérées en fonction de quatre étapes dans le régime.

En première étape, les données brutes des capteurs sont transmises au CH pour l'agrégation des données.

Dans une deuxième étape, les données agrégées sont transmises par le CH au  $M_{t-1}$  nœuds. Après, tous les nœuds  $M_t$  (y compris le CH) reçoivent les bits et codent la séquence de transmission selon certains systèmes, tel que le système d'Alamouti [6], STBC [39] ... etc.

Dans la troisième phase, chaque nœud transmet la séquence selon l'indice  $i$  pré-assigné. Enfin dans la dernière étape, le nœud de destination et ses  $M_{r-1}$  nœuds voisins reçoivent le signal, quantifient chaque symbole qu'ils reçoivent en  $n_r$  bits, puis le transmettent au nœud de destination.

Pour l'approche SISO, la procédure de communication est beaucoup plus simple. Le CH transmet toutes les données agrégées directement au nœud de destination.

Il est démontré que la consommation globale d'énergie dans les systèmes est liée, non seulement à la portée de transmission, mais aussi à la corrélation entre les données brutes du capteur, et peut être résolu comme un problème de programmation non linéaire suivant :

$$\min_p E_{DF+MIMO} = \sum_{i=1, i \neq p}^N N_i E_i^t + E_{bf} \sum_{i=1}^N N_i + \sum_{j=1, j \neq p}^{M_t} E_j^{t_0} + \sum_{i=1}^N N_i \gamma_i + E_b^r \sum_{i=1}^N N_i \gamma_i + \sum_{h=1}^{M_{t-1}} E_h^r n_r N_s \quad (2.3)$$

Où :

- $E_i^t$  : Quantité d'énergie consommée lors de la transmission d'un bit coté transmetteur.
- $N_i$  : est le nombre de bits à transmettre pour chaque nœud émetteur,  $i = 1 \dots N$ .
- $E_{bf}$  désigne la quantité d'énergie consommée par bit pour l'agrégation de données .
- $E_j^{t0}$  représente le coût de transmission locale de l'énergie par bit pour la communication de coopération .
- $\gamma_i$  est le pourcentage de données restantes après l'agrégation, qui reflète la corrélation entre des données de différents capteurs.
- $E_b^r$  désigne la quantité d'énergie consommée par bit pour la transmission longue distance MIMO.
- $E_h^r$  Quantité d'énergie consommée lors de la transmission d'un bit côté récepteur.
- $N_s$  est le nombre total de bits modulés reçus par chaque nœud côté récepteur.

Les résultats de simulation ont montré qu'avec une variation de  $\gamma = 100\%$ ,  $90\%$ ,  $80\%$ ,  $70\%$  et  $60\%$  que dans le cas où  $\gamma = 100\%$ , la consommation d'énergie totale du système MIMO sera meilleure pour une distance de transmission  $d = 22,8$  mètres. La valeur de la distance critique est très importante pour déterminer quelle solution SISO ou MIMO coopérative utiliser .

Une autre simulation pour examiner le rapport de la distance critique/la distance locale  $d_m$  pour différentes valeurs de  $\gamma$  a été réalisé, la distance critique diminue lorsque  $\gamma$  diminue sous toutes les valeurs de  $d_m$ .

Comme les résultats de simulation l'ont montré, en considérant à la fois les données d'agrégation et de coopération, la techniques MIMO permettra de réduire davantage la consommation totale d'énergie et prolonger ainsi la durée de vie du réseau.

### 2.4.3 Virtual MIMO-based coopérative communication for energy constrained Wireless Sensor Network

Dans [35], les auteurs comparent la technique MIMO à la technique SISO en terme d'efficacité énergétique et proposent un système MIMO basé sur la communication coopérative dans les réseaux de capteurs sans fil. Cette technique peut être utilisée comme suit :

Premièrement, la transmission sera du nœud émetteur aux nœuds coopératifs (communication locale [28]). Ensuite, chaque nœud utilise le codage spatio temporels en bloc *STBC* (Space Time Bloc Codes) [39] pour coder la donnée transmise.

Deuxièmement, la donnée codée sera envoyée aux nœuds récepteurs (communication à longue



distance).

L'énergie consommée lors de l'utilisation de la technologie MIMO coopérative est divisée en deux :

- Energie consommée lors de la communication locale.
- Energie consommée lors de la communication à longue distance.

Les auteurs supposent :

- $N_T$  : nœuds émetteurs.
- $N_R$  : nœuds récepteurs.
- $E_i^T$  : énergie par bit consommée par chaque nœud émetteur (communication locale),  $i=1\dots N_T$ .
- $E^L$  : énergie par bit consommée par chaque nœud lors d'une communication à longue distance.
- $L_i$  : chaque nœud capteur a  $L_i$  bits à transmettre

L'énergie totale consommée lors d'une communication de données dans un réseau de capteur sans fil est donnée par la formule suivante :

$$E^{MIMO} = \sum_{i=1}^{N_T} L_i E_i^T + E^L \sum_{i=1}^{N_T} L_i \quad (2.4)$$

L'énergie consommée lors de l'utilisation de la technologie SISO est donnée comme suit :

$$E^{SISO} = \sum_{i=1}^{N_T} L_i E_i^{SISO} \quad (2.5)$$

$E_i^{SISO}$  : est l'énergie consommée lors de la transmission d'une donnée d'un nœud  $i$  vers un autre nœud jusqu'à l'atteinte du nœud récepteur.

Une simulation a été élaboré et a montrer que :

L'utilisation de la technologie MIMO pour deux antennes à l'émission et à la réception offre 50% d'énergie sauvegardée par rapport à la technologie SISO.

Le délai de transmission et le pourcentage de l'énergie sauvegardée est très important dans les réseaux de capteurs sans fil, à cet effet l'architecture de la technologie MIMO basé sur la communication coopérative appliqué au réseau de capteurs sans fil offre un gain très intéressant soit en énergie, ou en délai de transmission.

## 2.5 Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons présenté quelques techniques de transmission/réception, à savoir, SISO (Single Input Single Output), MISO (Multiple Input Single Output) et MIMO (Multiple Input Multiple Output), dont la différence réside dans le nombre d'antennes en émission et en réception. Nous avons mis en évidence la technique MIMO, et présenté quelques travaux que nous avons jugé intéressants pour prouver l'accroissement potentiel apporté par ce type d'architecture.

Par la suite, nous proposons une stratégie MIMO coopérative dans une architecture hiérarchique basée sur la technique de clustering.

# 3

## Files d'Attente

### 3.1 Introduction

La théorie des files d'attente est une théorie mathématique relevant du domaine des probabilités, qui étudie les solutions optimales de gestion des files d'attente, ou queues. Une queue est nécessaire et se créera d'elle même si ce n'est pas anticipé, dans tous les cas où l'offre est inférieure à la demande, même temporairement. Elle peut s'appliquer à différentes situations : gestion des avions au décollage ou à l'atterrissage, attente des clients et des administrés aux guichets, ou bien encore stockage des programmes informatiques avant leur traitement. Ce domaine de recherches, né en 1917, des travaux de l'ingénieur danois Erlang sur la gestion des réseaux téléphoniques de Copenhague entre 1909 et 1920, étudie notamment les systèmes d'arrivée dans une queue, les différentes priorités de chaque nouvel arrivant, ainsi que la modélisation statistique des temps d'exécution. C'est grâce aux apports des mathématiciens Khintchine, Palm, Kendall, Pollaczek et Kolmogorov que la théorie s'est vraiment développée.

En quelques mots, cette théorie a pour objet l'étude du système où les entités, appelées clients, cherchent à accéder à des ressources, généralement limitées, afin d'obtenir un service. La demande concurrente d'une même ressource par plusieurs clients engendre des délais dans la

réalisation des services et la formation de files de clients désireux d'accéder à une ressource indisponible.

Dans ce chapitre, nous présentons quelques systèmes de files d'attente tels que :  $M/M/1$ ,  $M/M/m$ ,  $M/M/m/K$ ,  $M/M/\infty$  et leurs caractéristiques, ainsi que quelques réseaux de files d'attente, à savoir les réseaux de Jackson et BCMP.

## 3.2 Définition des files d'attente

Une file d'attente (queue) est un système stochastique composé d'un certain nombre (fini ou non) de place d'attente d'un ou plusieurs serveurs et bien sûr de clients qui arrivent, attendent, se font servir selon des règles de priorités données, et quittent le système 3.1.

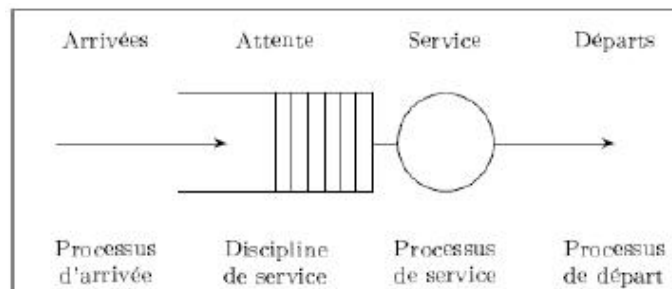


FIG. 3.1 – Représentation d'une file d'attente simple

## 3.3 Notation de Kendall-Lee

La notation de Kendall permet de décrire les files d'attente qui ont les propriétés ci dessous :

- Les instants auxquels les clients arrivent est un processus de renouvellement en temps discret ou continu. Autrement dit, les durées entre chaque arrivée successive sont *i.i.d.*, de loi  $A$  sur  $\mathbb{N}$  ou  $[0; \infty[$ . On numérote les différents clients à partir de 0 et l'on suppose que le client 0 arrive au temps 0. Ainsi, si  $T_n$  représente la durée entre l'arrivée du  $n^{eme}$  client et celle du  $(n+1)^{eme}$  client, les  $T_n$  sont *i.i.d.* (independantes et identiquement distribuées), de loi  $A$  et les instants d'arrivée sont  $0, T_1, T_2, T_3, \dots$
- Les temps de service des différents clients sont *i.i.d.*, et indépendants du processus des entrées. On note  $B$  la loi du temps de service, et  $U_n$  le temps de service du  $n^{eme}$  client. Ainsi,  $U_0, U_1, \dots$  sont *i.i.d.* de loi  $B$  et indépendants de  $T_n$ .

Un modèle est spécifié par une suite de six symboles :

$$A/S/m/K/P/D$$

La signification de chaque symbole est :

- $A$  : nature du processus des arrivées ;
- $S$  : nature du processus de service ;
- $m$  : nombre de serveurs ;
- $K$  : capacité d'accueil de la file d'attente ;
- $P$  : taille de la population ;
- $D$  : discipline de la file.

Dans la description des processus d'arrivée et de service, les symboles les plus courants sont :

- $M$  : loi Exponentielle (Memoryless)
- $E_k$  : loi d'Erlang- $k$ .
- $\Gamma$  : loi Gamma.
- $D$  : loi Déterministe (taux d'inter-arrivées ou de service constant).
- $G$  : loi Générale(quelconque).
- $GI$  : loi Générale Indépendante.
- $H_k$  : loi Hyper exponentielle- $k$ .
- $C_k$  : loi de Cox -  $k$ .
- $PH_k$  : loi de type "phase" à  $k$  étapes.

La forme abrégée est :  $A/S/m$  signifie que  $K$  et  $P$  sont infinies.

Lorsque les trois éléments de la notation de Kendall ne sont pas précisés, il est sous-entendu que  $K = \infty$ ,  $P = \infty$ ,  $D = FIFO$ .

### Exemple 3.1.

- $M/M/1$  : *Système à arrivée poissonnienne, à service exponentiel, à un seul serveur, et à une file infinie.*
- $M/M/1/N$  : *Même distribution que le système précédent, sauf que la file est limitée à  $N$  places.*

*Le paramètre  $N$  précise le nombre maximum d'utilisateurs susceptibles d'arriver dans la file.*

### 3.3.1 Processus des arrivées

Les clients arrivent au sein du système en décrivant un processus déterminé. Ils peuvent par exemple être réguliers et leurs arrivées sont espacées par un temps égal soit à  $t$  (c'est-à-dire : il

y a une arrivée à chaque  $t$  unité de temps) mais ce cas est rare et assez difficile à schématiser mathématiquement.

Le modèle le plus simple et le plus courant est celui des arrivées complètement aléatoires, ce qui est caractérisé par le processus de poisson.

### 3.3.2 Processus de service

La deuxième composante d'un système de files d'attente est la quantité de service demandée par un client. Dans la majorité des cas, on suppose que la population des clients est homogène, ce qui entraîne que les services demandés sont identiquement distribués, ou ont une distribution commune dite distribution de service.

En pratique on rencontre la distribution exponentielle qui est la plus simple à manipuler mathématiquement. Une priorité assez importante de cette distribution est son manque de mémoire, qui pourrait être caractérisé par le fait que le temps résiduel d'un service est indépendant du temps déjà écoulé de ce service.

### 3.3.3 Nombre de serveurs

Une station peut contenir plusieurs serveurs disposés en parallèle ou en série. Dès qu'un client arrive à la station, soit il trouve un serveur libre et le client entre immédiatement en service, soit tous les serveurs sont occupés et le client se place dans la file en attente d'un serveur qui se libère.

Pour définir une station multiserveurs, il faut définir la distribution de service de chacun des serveurs. La plupart du temps, les serveurs sont supposés identiques (ils possèdent donc la même distribution) et indépendants les uns des autres. Une station particulière est la station IS (Infinité Servers), dans laquelle le nombre de serveurs est infini. Cette station ne comporte donc pas de file d'attente. Dès qu'un client s'y présente, il trouve en effet instantanément un serveur disponible, et entre directement dans le service. Elle permet de modéliser des phénomènes de retard pur, le temps passé dans la station étant indépendant du nombre de clients simultanément présents et se réduit donc au temps de service.

**Capacité de la file :** La capacité de la file peut être finie ou infinie. Lorsqu'elle est limitée et qu'un client arrive alors que cette file est pleine, le client est perdu, où rentre dans l'orbite, s'il s'agit des systèmes avec rappels.

### 3.3.4 Disciplines du service

La discipline de service détermine l'ordre dans lequel les clients sont rangés dans la file et y sont retirés pour recevoir un service. Les disciplines les plus courantes sont :

- ▶ FIFO (First In First Out) ou PAPS (Premier Arrivé Premier Servi) :

C'est la file standard, dans laquelle les clients sont servis suivant l'ordre de leur arrivée.

- ▶ LIFO (Last In First Out) ou DAPS (Dernier Arrivé Premier Servi) :

Cela correspond à une pile, dans laquelle le dernier client arrivé (donc posé sur la pile) sera le premier traité (retiré de la pile).

- ▶ RANDOM (Aléatoire) :

Les clients accèdent au serveur de manière aléatoire, indépendamment de l'ordre des arrivés.

- ▶ Round-Robin (Cyclique) :

Tous les clients de la file d'attente entrent en service à tour de rôle, effectuent un quantum  $Q$  de leur temps de service et sont remplacés dans la file, jusqu'à ce que leur service soit totalement accompli. Cette discipline de service a été introduite afin de modéliser des systèmes informatiques en particulier.

- ▶ PS (Processor Sharing) :

C'est le cas limite de la distribution Round-Robin lorsque le quantum de temps  $Q$  tend vers 0. Tous les clients sont servis en même temps, mais avec une vitesse inversement proportionnelle au nombre de clients simultanément présents. Si le taux du service est égale à  $\mu$  et qu'à un instant donné il y a  $n$  clients à la station, tous les clients sont donc servis simultanément avec un taux  $\frac{\mu}{n}$ .

- ▶ Avec priorité :

Chaque client a une priorité (statique ou dynamique)(absolue ou relative), le serveur sélectionne le client de haute priorité.

- **Priorité relative** :

Un client accède au service selon sa priorité. La file est gérée par ordre de priorité de la plus forte à la plus faible.

- **Priorité absolue** :

Le service d'un client est interrompu lorsqu'un client de priorité supérieure se présente devant la file d'attente. Le client dont ce service est interrompu est remis en tête de la file.

## 3.4 Mesures de performances d'un système d'attente

La théorie des systèmes d'attente a comme objectif d'en étudier les structures et de calculer les valeurs caractéristiques permettant de décrire les performances d'un tel système et parmi les mesures les plus fréquemment utilisées sont :

- $\bar{N}$  : Nombre moyen de clients dans le système ;
- $\bar{Q}$  : Nombre moyen de clients dans la file d'attente ;
- $\bar{T}$  : Temps moyen de séjour d'un client dans le système ;
- $\bar{W}$  : Temps moyen d'attente d'un client dans la file ;
- $\bar{U}$  : Taux d'utilisation de chaque serveur.

Ces valeurs permettent de juger le comportement opérationnel d'un système d'attente.

Elles sont liées entre elles par les relations suivantes[12] :

$$\bar{N} = \lambda \bar{T}, \quad (3.1)$$

$$\bar{Q} = \lambda \bar{W} \quad (3.2)$$

$$\bar{T} = \bar{W} + \frac{1}{\mu}, \quad (3.3)$$

$$\bar{N} = \bar{Q} + \rho, \quad (3.4)$$

Où :

$\mu$  : représente le taux de service.

$\rho$  : est l'intensité du trafic ou la charge du système.

Les formules 3.1 et 3.2 sont appelées formules de **Little**.

## 3.5 Files markoviennes

Lorsqu'on considère une file dans laquelle les inter-arrivées et les services sont des variables aléatoires sans mémoire, dont le taux dépend du nombre de clients présents dans la file, plus précisément, lorsqu'à un instant donné, la file contient  $n$  clients, le temps au bout duquel le prochain client arrivera est supposé exponentiel de taux  $\lambda(n)$  et le temps au bout duquel un client en service terminera son service et quittera la file est supposé exponentiel de taux  $\mu(n)$ . On parle alors de loi markovienne dépendant de l'état par abus de langage (loi exponentielle dépendant de l'état).

De manière générale, une file est stable si et seulement si le nombre moyen d'arrivées de clients par unité de temps, noté  $\lambda$ , est inférieur au nombre moyen de clients pouvant être servis par



unité de temps. Si chaque serveur peut traiter  $\mu$  clients par unité de temps et si le nombre de serveurs est  $m$ , une file est stable si et seulement si :

$$\lambda \leq m\mu \Leftrightarrow \rho = \frac{\lambda}{m\mu} < 1$$

### 3.5.1 La file $M/M/1$

Considérons un système formé d'une file d'attente de capacité infinie et d'un unique serveur, la discipline de cette file est FIFO. Cette dernière modélise un guichet unique où chaque client reçoit un service dont la durée est une variable exponentielle de paramètre  $\mu$ , et le processus d'arrivée des clients dans la file est un processus de Poisson de taux  $\lambda$  (Le nombre de clients  $N(t)$  arrivant pendant un intervalle de temps  $[0,t]$  suit une distribution de Poisson). Ce système est connu sous le nom de file  $M/M/1$ .

$$P[N(t) = k] = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

La durée des inter-arrivées  $T$  sont exponentiellement distribuées de fonction de densité :

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad \forall t > 0$$

Les durées de service  $S$  sont exponentiellement distribuées de fonction de densité :

$$b(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad \forall t > 0$$

Les caractéristiques de ce système en régime stationnaire sont données par les relations suivantes :

– **Le taux d'utilisation du serveur est :**

par définition, le taux d'utilisation est la probabilité pour que le serveur de la file soit occupé :

$$\bar{U} = \rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

– **La probabilité qu'il y ait  $n$  clients dans le système à l'instant d'entrée est :**

$$\pi_n = \pi_0 \rho^n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

avec :

$$\pi_0 = 1 - \rho;$$

– Le temps moyen de séjour et d'attente :

$$\bar{T} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (3.5)$$

$$\bar{W} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (3.6)$$

### 3.5.2 La file $M/M/m$

On considère un système identique à la file  $M/M/1$  excepté qu'il comporte  $m$  serveurs identiques et indépendants les uns des autres.

Soit les processus d'arrivé des clients est poissonnienne de taux  $\lambda$  et temps de service exponentielle de taux  $\mu$  (pour chaqu'un des serveurs), ce système est connu sous le nom de la file  $M/M/m$  [53]. La condition de stabilité d'une file comportant  $m$  serveurs est :  $\lambda < m\mu$ , ceci exprime le

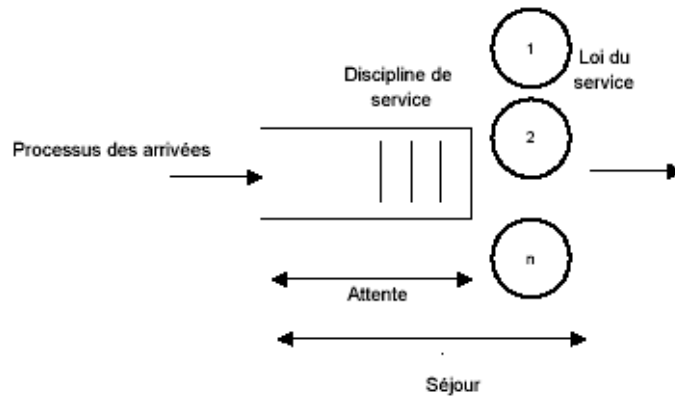


FIG. 3.2 – La file  $M/M/m$

fait que le nombre moyen de clients qui arrivent à la file par unité de temps doit être inférieur au nombre moyen de client que les serveurs de la file sont cap able de traiter par unité de temps.

les caractéristiques de ce système en régime stationnaire sont données par les relations suivantes :

– La probabilité qu'il y ait  $n$  clients dans le système à l'instant d'entrée est :

$$\pi_n = \begin{cases} \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} \pi_0, & si \quad n \leq m; \\ \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{m! m^{n-m}} \pi_0, & si \quad n > m; \end{cases} \quad (3.7)$$

où :

$$\pi_0 = \left[ \sum_{n=0}^m \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} + \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^{m+1}}{m!(m - \frac{\lambda}{\mu})} \right]^{-1}$$

$$\zeta = P(\text{attente}) = P(X \geq m) = \frac{\pi_m}{1 - \rho}$$

– Le taux d’utilisation de chaque serveur est :

$$\bar{U} = \rho = \frac{\lambda}{m\mu} \quad (3.8)$$

– Le temps moyen de séjour et d’attente sont :

$$\bar{T} = \frac{1}{\mu} \left( 1 + \frac{\zeta}{m(1 - \rho)} \right) \quad (3.9)$$

$$\bar{W} = \frac{\zeta}{m\mu(1 - \rho)} \quad (3.10)$$

### 3.5.3 La file $M/M/m/K$

Considérons un système à  $m$  serveurs identique à la file  $M/M/m$ , excepté que la capacité de la file d’attente est finie. On a donc toujours les hypothèses suivantes :

Le processus d’arrivée des clients dans la file est un processus de poisson de taux  $\lambda$  et le temps de service d’un client est une variable aléatoire exponentielle de taux  $\mu$ , soit  $K$  la capacité de la file d’attente, c’est le nombre maximal de clients qui peuvent être présent dans la file , et quand un client arrive alors qu’il y a  $k$  client dans la file dans ce cas il est perdu et doit repartir. Elle est toujours stable quelque soit l’intensité du trafic  $\rho = \frac{\lambda}{m\mu}$ . Ce système est connu sous le nom  $M/M/m/K$ .

Distribution stationnaire :

$$\pi_k = \begin{cases} \frac{(m\rho)^k}{k!} \pi_0 & k = 1, 2, 3, \dots, m - 1, \\ \frac{\rho^k m^m}{m!} \pi_0 & k = m, m + 1, \dots, K. \end{cases}$$

avec :

$$\pi_0 = \left[ 1 + \frac{(1 - \rho^{K-m+1})(m\rho)^m}{m!(1 - \rho)} + \sum_{k=1}^{m-1} \frac{(m\rho)^k}{k!} \right]^{-1}$$

si  $\rho \neq 1$  :

$$\pi_0 = \left[ 1 + \frac{(m)^m}{m!} (K - m + 1) + \sum_{k=1}^{m-1} \frac{(m)^k}{k!} \right]^{-1}$$

si  $\rho = 1$

– **Le taux d'utilisation de chaque serveur :**

$$\bar{U} = \left( \sum_{i=0}^m i\pi_i + \sum_{i=m+1}^K m\pi_i \right) / m \quad (3.11)$$

– **Le nombre moyen de clients dans le système :**

$$\bar{N} = \sum_{i=0}^K i\pi_i \quad (3.12)$$

– **Le nombre moyen de clients en attente :**

$$\bar{Q} = \sum_{i=0}^K (i - 1)\pi_i \quad (3.13)$$

Comme tout client arrivant doit repartir alors le taux effectif d'arrivée n'est plus  $\lambda$  mais  $\lambda' = \sum_{k=0}^{K-1} \lambda\pi_k = \lambda(1 - \pi_K)$  où  $\pi_k$  est la probabilité qu'il y ait  $k$  clients dans le système

– **Temps moyen de séjour :**

$$\bar{T} = \bar{N} / \lambda' \quad (3.14)$$

– **Temps moyen d'attente :**

$$\bar{W} = \bar{Q} / \lambda' \quad (3.15)$$

### 3.5.4 La file $M/M/\infty$

Dans ce type de file d'attente, on considère un système composé d'un nombre illimité de serveurs identiques et indépendants les uns des autres. Dès qu'un client arrive il rentre donc instantanément en service, cette file particulière ne contient donc pas de file d'attente.

On suppose toujours que le processus d'arrivé des clients est poissonien de taux  $\lambda$  et que les temps de service sont exponentielle de taux  $\mu$  (pour chaque'un des services). Ce système est connu sous le nom de  $M/M/\infty$

La capacité de traitement est infinie puisque tout nouveau client se présentant à l'entrée de la file est instantanément traité. La condition de stabilité exprime "que le nombre moyen de clients arrivant à la file par unité de temps doit être inférieur à la capacité de traitement de la

file” est donc toujours satisfaite, en d’autre terme la file M/M/∞ est toujours stable.

La loi stationnaire du nombre de clients dans le système pour tout entier  $n$  est :

$$P\{N = n\} = \pi_n = \pi_0 \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!}, n = 0, 1, \dots \quad (3.16)$$

En sommant sur tous les entiers et en remarquant que cette somme doit être égale à l’unité des probabilités totale nous pouvons déduire la probabilité  $p_0$  que le système soit vide.

$$\pi_0 = e^{-\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)}$$

Les caractéristiques de ce système sont données par les relations suivantes :

– **Le temps moyen de séjour :**

$$\bar{T} = \frac{1}{\mu} \quad (3.17)$$

– **Le temps moyen d’attente :**

$$\bar{W} = 0 \quad (3.18)$$

## 3.6 Les réseaux de files d’attente

### 3.6.1 Définition

La plupart des problèmes de modélisation de systèmes informatiques nécessite la prise en compte de systèmes à ressources multiples (unités centrales, canaux, mémoires, circuits de télécommunication, etc). Cette structure complexe conduit à l’étude de réseaux de files d’attente, plutôt qu’à celle des files d’attente simples à un seul serveur.

Un réseau de files d’attente est constitué d’un ensemble de stations de service et d’un ensemble de clients. Un client peut revenir à une file qu’il a déjà visité. Ces réseaux peuvent être très compliqués. Le plus souvent, seules les simulations sur ordinateur permettent de les étudier. les réseaux de files d’attente peuvent être ouverts ou fermés [25].

### 3.6.2 Réseaux exponentiels (Réseaux de Jackson)

L’étude des modèles de phénomènes d’attente s’avère souvent complexe car le flot des arrivées dans une station est la superposition des flots de requêtes en provenance des autres nœuds du réseau. Ce flot n’est pas Poissonien et les caractéristiques du réseau sont difficiles à déterminer. Il existe cependant une classe de modèles pour lesquels on arrive à obtenir une solution

simple : ce sont les réseaux exponentiels pour lesquels la distribution de probabilité des états s'obtient sous forme de produit. Cette propriété remarquable des réseaux exponentiels est une conséquence du théorème de **Burke** selon lequel les flots des départs sont Poissoniens [9].

En 1957, Jackson a décrit une classe générale de réseaux qui admettent une modélisation Markovienne. Ces réseaux possèdent une propriété remarquable permettant de simplifier leur étude en les étudiant station par station.

Soit le réseau de Jackson constitué de  $N$  files comme indiqué sur la figure suivante [47] [48]

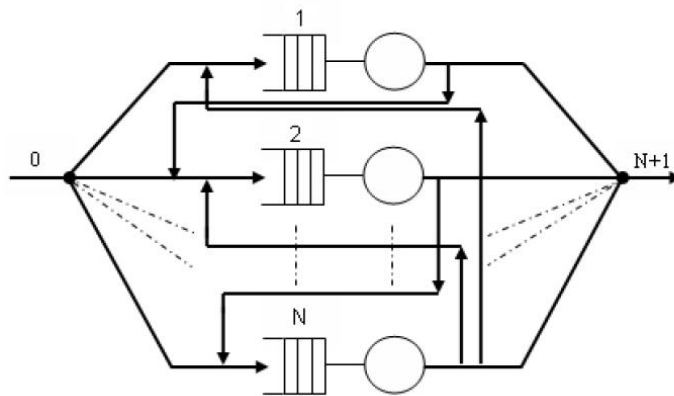


FIG. 3.3 – Réseau de Jackson ouvert

Ce réseau ne possède que des serveurs exponentiels de taux  $\mu_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Les clients sont acheminés dans le réseau suivant des probabilités de routage  $p_{ij}$  (probabilité en sortant de la file  $i$  d'aller vers la file  $j$ ). Le flux total des clients arrivant dans le système forme un processus de Poisson de paramètre  $\lambda$  avec une seule classe de clients, une capacité de stockage illimitée à toutes les stations, une discipline de service FIFO pour toutes les files. Les réseaux de Jackson possèdent la propriété d'avoir une distribution stationnaire en forme produit pour les probabilités conjointes des longueurs des files d'attente.

### 3.6.2.1 Performances du réseau

On étudie chaque file en isolation : longueur moyenne  $L_i$  de la station  $i$ , temps moyen de réponse  $W_i$  de la station  $i$ , La valeur  $e_i$  peut être interprétée comme le nombre moyen de passages d'un client par la station  $i$ . Puis, pour le réseau, on a tout simplement :

$$L = \sum_{i=1}^N L_i \quad (3.19)$$

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (3.20)$$

$$W = \sum_{i=1}^N e_i W_i \quad (3.21)$$

### 3.6.3 Les réseaux BCMP

Entre les années 1965 et 1975, les réseaux de Jackson ont été les seuls à être utilisés dans la modélisation et l'évaluation des systèmes informatiques en raison de leur très grande simplicité d'emploi. De plus, la distribution exponentielle a la qualité d'avoir un domaine d'application assez large : des lois relativement différentes de la loi exponentielle peuvent être remplacées par cette dernière sans que la solution finale ne diffère de façon sensible [25].

L'introduction de la modélisation des systèmes informatiques vers les années 1970, a relancé la recherche de solutions simples pour de nouveaux réseaux. C'est à cette évolution que nous devons la naissance des réseaux de Baskett, Chandy, Muntz et Palacios ou réseaux BCMP qui gardent la solution en forme produit à l'état d'équilibre en introduisant différentes classes de clients et de nouvelles disciplines de service.

#### 3.6.3.1 Types de réseaux BCMP

**Type 1 :** la station possède un seul serveur, la discipline de service est FIFO, les durées de service sont exponentielles de même moyenne pour toutes les classes de clients et le taux de service dépend du nombre de clients dans le serveur.

**Type 2 :** station à un seul serveur, le discipline de service est PS (Processor Sharing), la distribution du temps de service peut être une loi de Cox pouvant être différente pour chaque classe de clients.

**Type 3 :** le nombre de serveurs est suffisant pour qu'il y ait toujours un de libre, les distributions de service peuvent être des lois de Cox pouvant être distinctes pour chaque classe de clients.

**Type 4 :** station à un seul serveur, la discipline de service est LIFO avec une priorité préemptive et la distribution de service peut être une loi de Cox distincte pour les différentes classes de clients.

## 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les files d'attente, en mettant l'accent sur le type markovien. Nous avons également présenté quelques réseaux de files d'attente, à savoir, les réseaux de Jackson et les réseaux BCMP.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter une stratégie MIMO coopérative pour les réseaux de capteurs sans fil et modéliser la communication "intra et inter" - cluster par les réseaux de files d'attente.



# 4

## Modélisation et évaluation des performances de ANCAEE - MIMO

*Seule la pratique permet  
de progresser dans la  
maîtrise de l'art de  
la Simulation.*

### 4.1 Introduction

Les capteurs sont généralement munis d'une ressource énergétique à durée de vie limitée et sont, la plupart du temps, déployés dans des endroits inaccessibles, donc toute intervention pour changer ou recharger les batteries est pratiquement impossible. Ceci fait que la durée de vie du réseau dépende de la consommation d'énergie. En effet, les différentes tâches effectuées par les nœuds capteurs contribuent à l'épuisement de leur ressources énergétiques. Ainsi, les nœuds ne pourront plus participer au routage des données afin de les acheminer vers la station de base. Ainsi, la topologie du réseau peut être changée. C'est pourquoi, l'optimisation de

consommation d'énergie est primordiale.

Ce chapitre présente notre stratégie MIMO coopérative pour les réseaux de capteurs sans fils que nous avons nommé ANCAEE-MIMO, dont l'objectif principal étant de prolonger la durée de vie du réseau tout en assurant le bon acheminement des paquets vers la station de base.

Du fait que la communication représente la plus grande proportion de l'énergie totale consommée au niveau d'un nœud capteur (environ plus de 70% ), nous nous sommes intéressées, par la suite à la modélisation puis à l'évaluation de performances de la communication "intra et inter" - clusters de notre proposition par les réseaux de files d'attente.

Les techniques les plus utilisées pour la modélisation et l'évaluation de performances d'un système donné, par exemple les réseaux de capteurs sans fil, sont :

- Les techniques analytiques qui sont basées sur des outils mathématiques, tel que les chaînes de Markov, les réseaux de Pétri et les réseaux de files d'attente.
- La simulation réalisée à l'aide d'outils logiciel, par exemple MATLAB et JAVA, parmi les simulateurs les plus connus sont : NS2, OPNET, QNAP...

## 4.2 Motivation

La plupart des solutions proposées pour le routage dans les réseaux de capteurs s'appuient sur une vue à plat où tous les nœuds sont au même niveau et effectuent les mêmes tâches. Par ailleurs, certaines applications nécessitent un nombre élevé de capteurs. Ceci implique un nombre élevé de messages circulant dans le réseau et conduit donc à l'épuisement des ressources énergétiques des capteurs. L'une des solutions communément utilisées pour le routage dans les réseaux de capteurs sans fil est l'utilisation d'une architecture hiérarchisée appelée encore clustering.

Nous avons vu, d'une part, que les protocoles de routage basés sur cette architecture hiérarchique apportent de nombreux avantages en termes de consommation d'énergie et de prolongement de la durée de vie du réseau, D'autre part, parmi les techniques de transmission/ réception des données (SISO, MISO, SIMO et MIMO) la technique MIMO est meilleure en termes de gains énergétiques. L'utilisation de cette dernière pourvue de plusieurs antennes à l'émission et de plusieurs antennes à la réception permet potentiellement d'augmenter les performances des systèmes sans fils.

Néanmoins, l'application directe de la technique MIMO au contexte des réseaux de capteurs est difficile vu la taille très petite des capteurs qui, à priori, ne peuvent supporter qu'une seule antenne. Heureusement que la coopération entre capteurs est possible tant à l'émission qu'à la réception pour former un système MIMO "coopératif".

Afin de tirer profit des avantages des deux techniques, nous proposons d'appliquer la technique MIMO "coopérative" sur un protocole de routage hiérarchique (**ANCAEE : A Novel Clustering Algorithm for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks**) et ce, dans le but de réduire d'avantage la perte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils.

### 4.3 Proposition d'une stratégie MIMO coopérative pour les RCSFs.

A présent nous allons présenter nos apports sur l'algorithme (ANCAEE) qui, consiste à élire deux CHs dans chaque cluster, à savoir, un MCH (Maître Cluster Head) et un SCH (Secondaire Cluster Head), au lieu, d'un seul, et cela pour que les deux CHs coopèrent pour former un système MIMO( $2 \times 2$ ).

La sélection du MCH se base sur l'algorithme (1.8.5), le but d'avoir des SCHs est de réaliser un gain en diversité dans la communication inter-clusters grâce à la coopération MIMO des nœuds.

En ce qui concerne la communication "intra et inter" - clusters, on s'est inspiré de l'approche [51] .

#### 4.3.1 Election des MCHs

On suppose qu'il y a  $S$  nœuds dans le champ de capture, ayant la même énergie initiale, et commencent tous le processus de clusterisation dans un état "Indécis".

On a assigné à chaque nœud un identifiant unique  $i$ , pour  $i=1, \dots, S$ .

A l'origine, tous les nœuds sont semblables, c.à.d., il n'y a pas de MCH dans chaque cluster.

Initialement, la sélection des MCHs se fait d'une manière aleatoire.

Lorsqu'un MCH atteint un seuil prédéterminé (20% de l'énergie initiale), un nœud  $q$  est choisi parmi les nœuds de son cluster et devient le nouveau MCH. On vérifie simultanément les deux conditions suivantes :

- le nœud capteur n'a pas déjà été élu CH précédemment.

- l'énergie résiduelle d'un nœud capteur est supérieure à la moyenne d'énergie de tous les nœuds capteurs du clustering.

Lorsqu'un nœud devient MCH, il se change en état "Décidé" ainsi que ses voisins.

L'algorithme s'arrête lorsque tous les nœuds seront dans un état "Décidé" (soit devenu MCH ou voisin du MCH).

### 4.3.2 Formation des clusters

Une fois que les MCHs sont élus, ils diffusent un message d'annonce avertissement ADV à tous les nœuds du réseau, Chaque nœud capteur non-MCH détermine quels clusters à joindre, en choisissant le MCH qui requière un minimum d'énergie de communication, Chaque nœud non-cluster utilise CSMA pour envoyer le message aux MCHs en les informant sur le cluster auquel il veut appartenir.

### 4.3.3 Election du SCH

L'un des voisins du MCH est élu SCH de la même manière que son maître. Il est donc le second nœud vérifiant les critères de l'algorithme de sélection du MCH.

### 4.3.4 Description de la communication "intra et inter" - clusters

Une fois que le clustering est établi comme on l'a déjà décrit précédemment, le processus de communication "intra et inter"-clusters se fait comme suit :

- Communication intra-clusters 4.1 :
  - Tous les nœuds non-MCH sont capables de communiquer avec le MCH de leur cluster.
  - Chaque nœud non-MCH transmet ses données brutes au MCH.
  - MCH agrège les données reçues.
  - MCH envoie une copie des données agrégées au SCH.

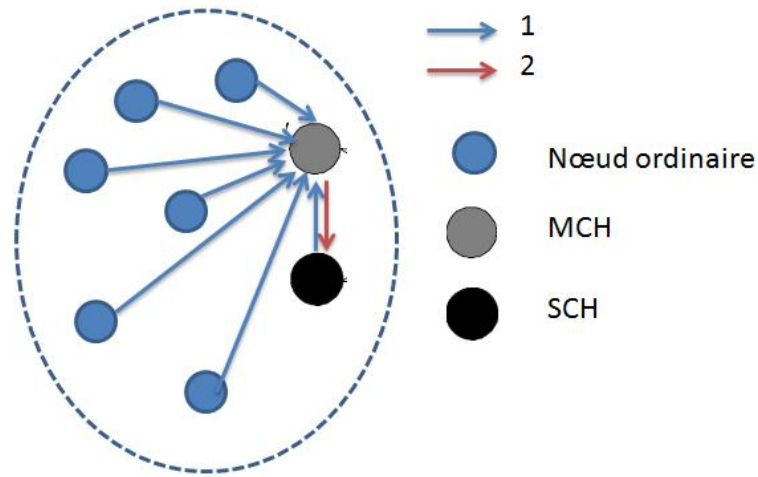


FIG. 4.1 – Communication intra-clusters

– Communication inter-clusters

Le MCH et le SCH dans un cluster communiquent avec le MCH et le SCH d'un autre cluster, grâce à la coopération MIMO.

Considérons deux clusters adjacents (cluster émetteur et cluster récepteur), chaque cluster est représenté par deux CHs (MCH et SCH). Les CHs émetteurs envoient les données aux CHs récepteurs (MCH et SCH) comme le montre la figure ci-dessous :

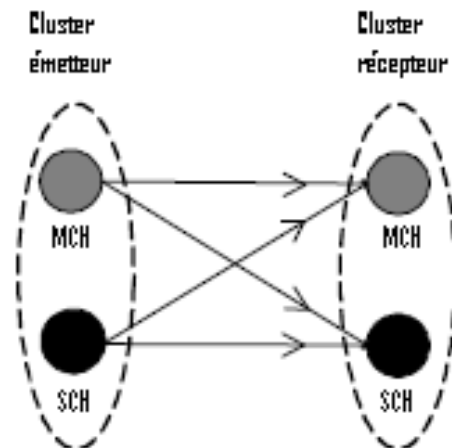


FIG. 4.2 – Communication inter-clusters

## 4.4 Description du système

Notre système représente une zone de capture d'une surface de  $(100 \times 100)m^2$  comportant 100 capteurs, une station de base qu'on a fixé au milieu et dont les coordonnées  $(50 \times 50)m^2$ . Un capteur a pour but de surveiller et de détecter les événements qui s'y produisent, de ce fait, les entités de notre système, ainsi recensées, sont :

- **La station de base** : elle est responsable de l'envoi des requêtes et de la collecte des données du réseau.
- **Les Nœuds capteurs** : ils servent à détecter les événements et participent au routage des informations dans le réseau.

Le modèle réseau utilisé consiste en un ensemble de capteurs sans fil, immobiles, aléatoirement dispersés sur le terrain simulé et dont l'énergie initiale de chacun d'entre eux est fixée à 5 joules.

### 4.4.1 Modèle d'énergie

Le modèle radio (voir figure 4.3) proposé par Heinzelman et al. [32] a été utilisé pour calculer l'énergie consommée en émission et en réception des messages. Selon ce modèle, l'énergie consommée pendant la transmission ( $E_e$ ) d'un message de  $pk$  bits est donnée par :

$$E_e = E_{elec} \times pk + E_{amp} \times pk \times d^2$$

Alors que l'énergie consommée pendant la réception ( $E_r$ ) d'un message de  $pk$  bits est donnée par :

$$E_r = E_{elec} \times pk$$

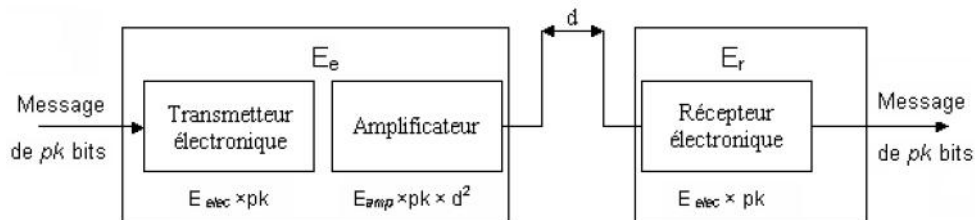


FIG. 4.3 – Modèle d'énergie

Où :

- $E_e$  est l'énergie consommée en émission.
- $E_r$  est l'énergie consommée en réception.

- $E_{elec}$  est l'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique) dont la valeur est fixée à 100 pJ/bit.
- $E_{amp}$  est l'énergie nécessaire pour l'amplification (l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur) dont la valeur est fixée à 50 nJ/bit.
- $pk$  est la taille en bit d'un paquet de données.
- $d$  est la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur.

#### 4.4.2 Variables descriptives du système

Les différentes variables utilisées dans notre système sont illustrées dans le tableau suivant :

Définition de la variable	Nom de la variable	Type	Unité de mesure
Energie consommée lors de l'émission d'un message	$E_e$	Réel	Joule
Energie consommée à la réception d'un message	$E_r$	Réel	Joule
Energie résiduelle (ou courante) d'un capteur	$E_c$	Réel	Joule
Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D	(x,y)	(Réel,Réel)	(Mètre, Mètre)
Distance entre deux capteurs	d	Réel	Mètre
Portée de transmission	Portée	Réel	Mètre
Nombre de clusters	nbr-cluster	Entier	—
Nombre de capteurs dans le réseau	S	Entier	—
Durée de simulation	Tmax	Réel	Seconde
Energie résiduelle moyenne des CHs	$Moy$	Réel	Joule
Taux d'arrivées des paquets	$\lambda$	Réel	clients/seconde
Taux de transmission	$\mu$	Réel	clients/seconde

TAB. 4.1: Variables descriptives du système

1. **Energie résiduelle** : elle est exprimée par la différence entre l'énergie courante et l'énergie consommée par un capteur. L'énergie d'un capteur est mise à jour par l'affectation

suivante :

$$E_c = E_c - E_x = \begin{cases} E_x = E_e & \text{si le capteur envoie un message;} \\ E_x = E_r & \text{si le capteur reçoit un message.} \end{cases} \quad (4.1)$$

**Moyenne énergie résiduelle des CHs :**

$$Moy = \frac{moy_1 + moy_2}{2 \times nbr - cluster}$$

Où :

$moy_1$  : est l'énergie résiduelle moyenne des MCHs (Cluster-Head Maître ).

$moy_2$  : est l'énergie résiduelle moyenne des SCHs (Cluster-Head Secondaire).

2. **Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D** : c'est l'affectation de deux valeurs aléatoires (x et y), comprises entre 0 et la taille du terrain, à chaque capteur sur un plan à deux dimensions.
3. **Distance entre deux capteurs** : c'est la distance euclidienne entre un capteur de coordonnées (x , y) et un autre de coordonnées (x', y') :

$$d = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (4.2)$$

4. **Taux d'arrivées** : le nombre moyen d'arrivées de paquets par unité de temps.
5. **Taux de service** : nombre moyen de paquets pouvant être servis par unité de temps.

## 4.5 Choix du langage de programmation

MATLAB est un logiciel de calcul numérique produit par MathWorks. Matlab est un langage simple et très efficace, optimisé pour le traitement des matrices, d'où son nom. Pour le calcul numérique, Matlab est beaucoup plus concis que les langages : C, Pascal ...etc. On peut traiter la matrice comme une simple variable. Matlab contient également une interface graphique puissante, ainsi qu'une grande variété d'algorithmes scientifiques.

Notre choix s'est porté sur ce langage car nous estimons qu'il est l'un des langages de programmation mathématique les plus puissants qui existent actuellement.

## 4.6 Le modèle mathématique

La communication "intra et inter" - clusters peut être modélisée comme ci-dessous :



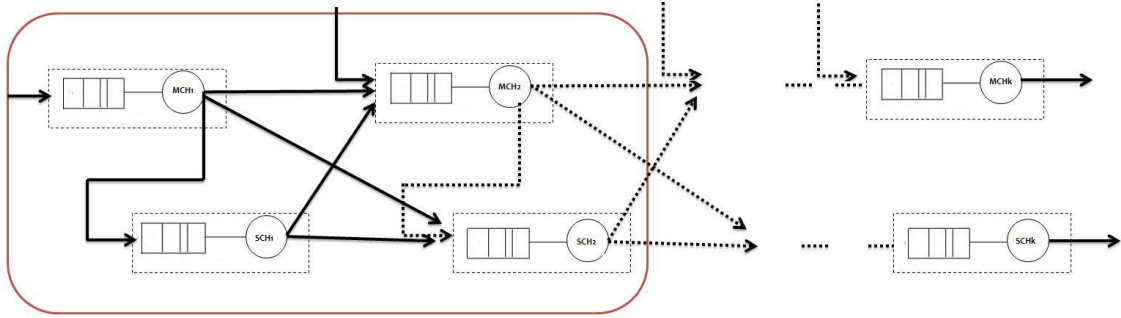


FIG. 4.4 – Le modèle mathématique

Où :

1. **Le client** : représente les données transmises par les nœuds non MCHs ;
2. **Les serveurs MCH1, MCH2, ..., MCH $k$**  : représentent les MCHs ( Cluster-Head Maitres) de chaque cluster  $i$  ( $i = \overline{1, k}$ ) dont le service est la transmission des données agrégées aux CHs (MCH( $i+1$ ), SCH( $i+1$ ) et SCH( $i$ )) adjacents après les avoir agrégés puis dupliqués
3. **Les serveurs SCH1, SCH2, ..., SCH $k$**  : représentent les SCHs (Cluster-Head Secondaires) de chaque cluster  $i$  ( $i = \overline{1, k}$ ) dont le service est la duplication et la transmission des données agrégées reçus.

Ainsi, la transmission se fait cluster par cluster jusqu'a atteindre la station de base.

On remarque que dans le réseau de files d'attente formé, il n'y a pas de probabilités de passage des messages entre les CHs vu que c'est une duplication du même message qui doit être transmis aux CHs destinataires. On ne peut donc pas utiliser des méthodes analytiques (comme pour les réseaux de Jackson ou BCMP) pour obtenir les caractéristiques. On a ainsi eu recours à la simulation ou nous modélisons chaque sous-système par une file d'attente de type M/M/1/K/FIFO. Ce système d'attente est le plus adapté à notre modélisation ; on suppose que le trafic d'arrivée est régulier et peut être modélisé par un processus de Poisson de paramètre  $\lambda$ , le taux de service est exponentiel de paramètre  $\mu$ .

## 4.7 Etapes de réalisation du simulateur

Les étapes de réalisation de notre simulateur sont les suivantes :

- **Initialisation des variables** : cette étape correspond à la déclaration des variables globales (nombre de capteurs, surface du terrain simulé, temps de simulation et taille

du paquet), leur initialisation, la création des capteurs (portée de transmission, capacité énergétique,  $E_{amp}$  et  $E_{elec}$ ) et leur déploiement aléatoire sur le terrain simulé.

- **Découverte des voisins** : la découverte des voisins est exécutée automatiquement au lancement de l'application. La découverte des voisins se fait par diffusion. Chaque capteur se trouvant à une distance inférieure ou égale à la portée de transmission d'un autre capteur est sensé recevoir les messages diffusés par ce dernier et est, de ce fait, considéré comme son voisin.
- **Election des MCHs et SCHs** : l'élection des CHs (MCHs et SCHs) se fait par l'algorithme cité dans 4.3.1.
- **Générer des événements** : la génération des événements se fait dans un même endroit d'une manière aléatoire au lancement de l'application. La figure 4.5 montre un exemple du résultat des quatre étapes précédentes :

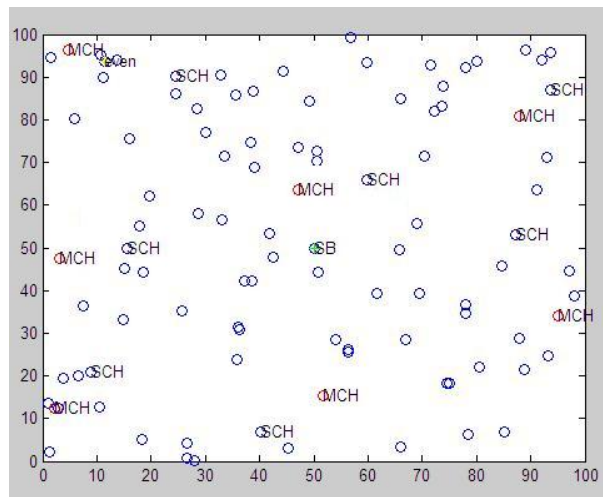


FIG. 4.5 – Représentation des quatre étapes précédentes

- **Détermination du plus court chemin 4.6** : le plus court chemin sera du capteur à proximité des événements vers la station de base (le nombre de sauts minimal entre les événements et la station de base) est un vecteur qui va nous retourner les identifiants des MCHs composant le plus court chemin obtenu en appliquant l'algorithme de **Dijkstra** illustré dans l'annexe.

Le plus court chemin obtenu est représenté par la figure suivante :

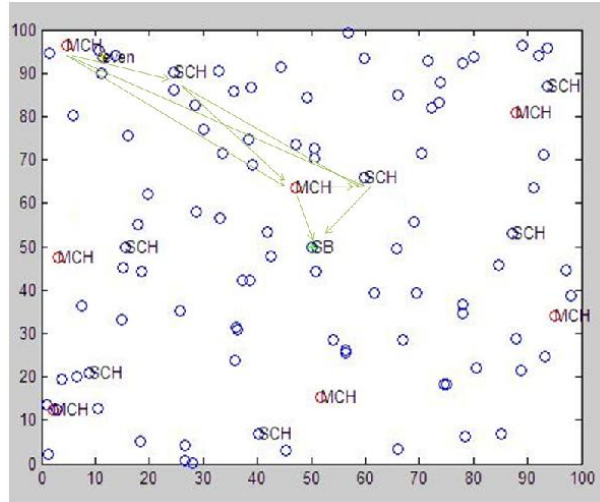


FIG. 4.6 – Le plus court chemin

- **Modélisation du chemin sous forme d’un réseau de files d’attente** : a partir du plus court chemin obtenu, on forme un réseau de files d’attente extrait de 4.4.
- **Simulation et évaluation des performances du réseau de files d’attente** : L’analyse analytique (mathématique) du réseau de files d’attente obtenu est très complexe. A cet effet, dans le but d’analyser ce système, nous allons exploiter l’approche simulation à évènements discrets.

## 4.8 Métriques de performances

Nous commençons tout d’abord par préciser les métriques que nous avons jugées intéressantes à étudier :

- **Nombre de clusters** : mesure le nombre moyen de clusters formés durant la clusterisation.
- **Nombre total de paquets traité par les CHs** : est le nombre de paquet transmis par les CHs (MCH et SCH) jusqu’à atteindre la station de base.
- **L’énergie résiduelle** : mesure en moyenne la quantité d’énergie restante pour un capteur lors de la transmission.
- **Temps de séjour ( $T$ )** : temps moyen de séjour d’un client dans le système ;
- **Nombre de paquets perdus (*perdu*)** : les paquets rejetés par le système ;

### 4.8.1 Interprétation des résultats de simulation

Une fois les résultats obtenus, nous passons à l'interprétation de ces derniers pour aider à comprendre le fonctionnement du modèle et faciliter toute modification ou mise à jour du modèle. Les résultats de l'exécution du simulateur sont donc rangés dans les tableaux 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 et 4.6.

#### 1. Nombre de clusters

En fixant la taille du paquet à 100 bits,  $T_{\max}=360$  s et  $\lambda=5$  paquets/s.

Nous faisons varier la portée de transmission des capteurs afin de voir son impact sur le nombre de clusters formés.

Portée	10	15	20	25	30	35	40
Nombre de clusters	32	18	11	7	6	5	4

TAB. 4.2: Le nombre de clusters en fonction de la portée de transmission

Nous constatons que le nombre de clusters formés, comme le montre le tableau 4.2, diminue avec l'augmentation de la portée des capteurs (densification du réseau). La formation des clusters est fortement tributaire de la portée, lorsque la portée est faible, chaque MCH n'a qu'un très peu nombre de nœuds capteurs (appelés aussi nœuds membres) à recouvrir. Plus on augmente la portée de transmission, plus les MCHs recouvrent davantage de nœuds membres, ce qui conduit en plus de la stratégie de clustering adaptée à augmenter le nombre de capteurs par cluster et aussi à diminuer le nombre de clusters.

#### 2. Energie résiduelle

##### a) Energie résiduelle en fonction de la portée de transmission

En fixant  $T_{\max}$  à 360 s, nous allons faire varier la portée de transmission et nous nous intéressons à l'influence de cette dernière sur l'énergie résiduelle moyenne des CHs.

Portée	10	15	20	25	30	35	40
<i>Moy</i>	4.782	4.756	4.667	4.570	4.380	4.087	3.861

TAB. 4.3: L'énergie résiduelle en fonction de la portée de transmission en 360s

Le tableau 4.3 montre la diminution des énergies résiduelles moyennes des CHs en fonction de la portée de transmission des capteurs lors de la transmission de l'événement détecté vers la station de base.

La diminution de l'énergie résiduelle implique une augmentation de la quantité de l'énergie consommée avec la densification, car l'augmentation de la portée de transmission d'un capteur, engendre l'augmentation de la distance entre les CHs, conduisant ainsi à l'augmentation du nombre de capteurs dans le voisinage (ce qui influe sur l'énergie consommée en émission et en réception).

**b) En fixant la taille du paquet à 100 bits, en augmentant la durée de simulation fixée cette fois à 1000 s.**

Nous allons à présent faire varier la portée de transmission et nous nous intéressons à l'influence de cette dernière ainsi que le temps de simulation sur l'énergie résiduelle moyenne des CHs.

Portée	10	15	20	25	30	35	40
<i>Moy</i>	4.290	30866	3.708	3.567	2.897	1.941	1.688

TAB. 4.4: L'énergie résiduelle en fonction de la portée de transmission en 1000 s

Le tableau 4.4 montre la diminution des énergies résiduelles moyennes des CHs en fonction de la portée de transmission des capteurs lors de la transmission de l'événement détecté vers la station de base.

On constate aussi la diminution de l'énergie résiduelle lorsque  $T_{max} = 1000$  s par rapport à celle obtenue lorsque  $T_{max}$  a été fixé à 360 s. Ceci est dû à l'augmentation du nombre de paquets transmis engendrant ainsi une augmentation de l'énergie consommée.

**c) Energie residuelle (*Moy*), temps de séjour ( $T$ ) et le nombre de paquets perdus (*perdu*) en fonction du taux de service  $\mu$**

Nous faisons varier le  $\mu$  entre 10 et 60, nous fixons  $T_{max}$  à 360 s et la taille du paquet à 100 bits .

$\mu$	10	20	30	40	50	60
<i>Moy</i>	4.779	4.719	4.605	4.273	4.135	3.870
<i>T</i>	0.612	0.233	0.146	0.106	0.095	0.060
<i>Perdu</i>	50	37	35	30	28	23

TAB. 4.5: Variation de *Moy*, *T* et *perdu* en fonction de  $\mu$

On constate que *Moy*, *T* et *perdu* diminue proportionnellement avec l'augmentation du taux de service, qui est dû à l'augmentation du nombre de paquets traités en unité de temps.

#### d)Energie résiduelle en fonction de la taille du paquet

A présent, nous faisons varier la taille du paquet entre 50 et 350 tout en fixant le Tmax à 360 s et le taux de service à 20 paquets/s.

$P_k$	50	100	150	200	250	300	350
<i>Moy</i>	4.835	4.540	4.396	4.084	3.878	3.640	3.256

TAB. 4.6: Variation de *Moy* en fonction de la taille du paquet

On remarque que l'énergie résiduelle diminue en augmentant la taille du paquet mais elle reste raisonnable, ceci s'explique par le fait que l'énergie consommée se calcule en fonction de la taille du paquet.

#### e)Comparaison des énergies résiduelles de LEACH et ANCAEE-MIMO en fonction du nombre de nœuds dans le réseau

Nous avons fixé le taux de service des CHs à 20 paquets/s, la taille du paquet à 100 bits, la portée de transmission à 20 mètres, le Tmax à 360 s, tout en faisant varier le nombre de nœuds de 100 à 350.

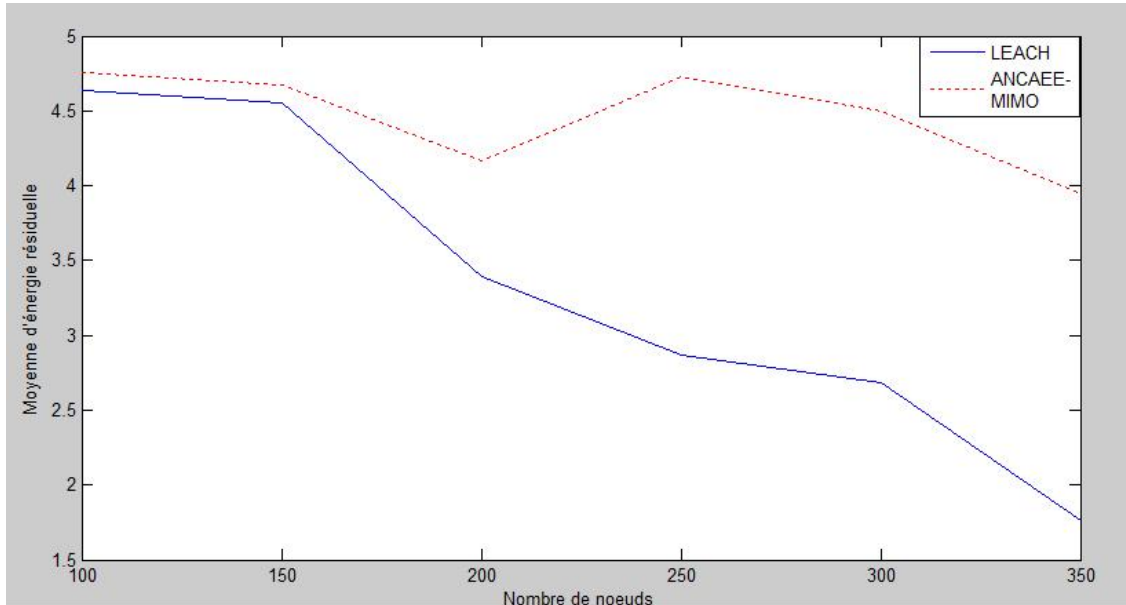


FIG. 4.7 – Moyenne énergie résiduelle

La figure 4.7 montre une influence du nombre de nœuds sur la moyenne des énergies résiduelles des CHs, tel que :

- De 100 à 150 nœuds : la moyenne des énergies résiduelles varie entre 4.5 et 5 J pour les deux protocoles.
- Au-delà de 150 nœuds, la différence entre les moyennes des énergies résiduelles des deux protocoles est remarquable, où le protocole ANCAEE-MIMO reste dans les alentours de 4 à 5 J. Par contre, le LEACH subit une diminution considérable et continue.

Nous constatons que notre protocole surperforme le LEACH quel que soit le nombre de nœuds capteurs. En outre, les techniques de transmission utilisées entre les nœuds pour router les données à la station de base dans le protocole proposé adopte un routage multi-sauts. Or, le routage de données dans le protocole LEACH par exemple est effectué via un seul saut, ce qui consomme beaucoup d'énergie pour atteindre la station de base, où le CH est supposé avoir une large portée de communication afin que les données puissent atteindre la station de base en un saut. Mais en pratique, ceci n'est pas toujours une hypothèse réaliste ; les CHs sont des capteurs ordinaires et la station de base n'est souvent pas directement accessible par tous les nœuds à cause des problèmes de propagation du signal, par exemple, en raison de la présence d'obstacles.

## 4.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la communication dans un réseau de capteurs sans fil de type MIMO sous forme d'un réseau de files d'attente. Par la suite, nous l'avons implémenté sous Matlab pour mesurer ses performances en terme de :

- nombre de clusters formés en fonction de la portée de transmission ;
- énergies résiduelles en fonction de la portée de transmission, la taille du paquet et le taux de service ;
- temps de séjour et le nombre de paquets perdus en fonction du taux de service.

Les résultats obtenus par ces derniers reflètent bien la réalité et montre l'influence de la portée de transmission, la taille du paquet, ainsi que le taux de service sur l'énergie résiduelle du réseau. Afin de valider notre proposition, une étude comparative à été menée par simulation entre ANCAEE-MIMO et le protocole LEACH. Les énergies résiduelles obtenues ont été évaluées en fonction du nombre de nœuds dans le terrain. Les résultats de la simulation permettent de constater le gain d'énergie dans le protocole ANCAEE-MIMO en le comparant à LEACH. Ceci s'explique par une adaptation d'un routage multi-sauts et une technique de transmission/réception de type MIMO pour atteindre la station de base.



# Conclusion générale

La technologie des réseaux de capteurs sans fil ne cesse de se développer et de s'imposer dans divers domaines d'application, par l'ampleur des avantages qu'elle offre. Cependant, les concepteurs de ce type de réseaux doivent faire face à de nombreux défis, tels que la limitation d'énergie. Pour ce faire, l'une des solutions communément utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil est l'utilisation d'une architecture hiérarchisée appelée encore clustering.

La dissipation d'énergie est fortement liée aux trois principales tâches accomplies par un nœud et qui sont : la capture , le traitement de données et la communication.

On estime que la transmission des données d'un capteur représente environ 70% de sa consommation d'énergie. C'est pour cela d'ailleurs que plusieurs autres travaux ont été établis dans la direction d'émetteur/récepteur cherchant à fournir de meilleurs gains énergétiques. La technologie MIMO est l'une des techniques de transmission/ réception jugée performante en terme d'optimisation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce mémoire, afin de réaliser un meilleur gain énergétique, nous avons présenté notre proposition nommée " ANCAEE-MIMO" qui adapte la technique MIMO sur un protocole hiérarchique ANCAEE et consiste à élire deux CHs dans chaque cluster à savoir (MCH : Maitre Cluster Head et SCH Secondaire Cluster Head), au lieu, d'un seul, et cela pour que les deux CHs coopèrent pour former un système MIMO( $2 \times 2$ ).

Nous nous sommes intéressés à la modélisation de la communication "intra et inter" - clusters de notre proposition. Pour ce faire, nous avons fait appel à la théorie des files d'attente et vu la difficulté de l'étude analytique du réseau approprié, nous avons eu recours à la simulation

à événement discret.

L'analyse du modèle et l'application de l'approche simulation nous a permis de constater l'influence de la portée de transmission, la taille du paquet ainsi que le taux de service sur l'énergie résiduelle du réseau et nous a donné la possibilité de réaliser une comparaison entre les protocoles ANCAEE-MIMO et LEACH. Cette étude comparative a prouvé l'efficacité de ANCAEE-MIMO en terme d'énergie, vu son adaptation d'un routage multi-sauts et une technique de transmission/réception de type MIMO pour atteindre la station de base.

Il sera intéressant de compléter cette étude :

- En prenant en considération d'autres lois d'inter-arrivées ou de service tel que : la loi d'Erlang, loi de Gamma, etc ;
- Utilisation d'un autre protocole de clusterisation, en particulier le choix du cluster-head secondaire (SCH) ;
- Etendre le réseau à un système MIMO( $N \times M$ ), où  $N > 2$  est le nombre de CHs émetteurs,  $M > 2$  : nombre de CHs récepteurs ;
- Utilisation d'autres algorithmes de cheminement ;
- Adaptation de la technique MIMO sur d'autres protocoles de routage hiérarchiques.

# Bibliographie

- [1] A. A. Abbassi and M. Younis. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *IEEE Xplore*, 30(14) :2826–2841, 2007.
- [2] A. P. Abidoeye, N. A. Azeez, A. O. Adesina, and K. K. Agbele. Ancaee : A novel clustering algorithm for energy efficiency in wireless sensor networks. 3(9) :307–312, 2011.
- [3] M. Achir and L. Ouvry. A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks. 2(5) :442–453, 2005.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications*, 40(8) :102–116, 2002.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks :The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 38(15) :393–422, 2002.
- [6] S. M. Alamouti. A simple diversity technique for wireless communications. *IEEE J. Select. Areas Commun*, 16 :1451–1458, 1998.
- [7] S. M. Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE on select area in communications*, 16(8) :1451–1458, 1998.
- [8] A. Amokrane. *Plateforme web services pour l’interrogation et la gestion d’un réseau de capteurs sans fil*. Mémoire d’ingénieur d’état en informatique. Ecole nationale Supérieure d’Informatique (E.S.I, EX. INI), 2010.
- [9] A. Aïssani and D. Aïssani. *Réseaux de files d’attente. Post-Graduation en Informatique, USTHB Alger, 1988*.
- [10] W. Bechkit. *Un nouveau protocole de routage avec conservation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. Mémoire d’état en informatique, E.S.I, EX. INI, 2009.
- [11] K. Beydoun. *Conception d’un protocole de routage hierarchique pour les réseaux de capteurs*. Thèse de Docteur en Informatique, Université de Franche-Comte, 2009.

- [12] S. K. Bose. *An introduction to queueing systems*. Kluwer Academic/ Plenum Publishers, New York, 2002.
- [13] C-D. Braginsky and D. Estrin. *Rumor routing algorithm for sensor networks*. In proceedings of the 1st ACM international workshop on wireless sensor networks and applications (WSNA), pages 22-31, New York, 2002.
- [14] M. J. Brown. *Users Guide Developed for the JBREWS Project*. Technical Report , Los Alamos National Laboratory of California University, 1999.
- [15] R. Govindan C. Intanagonwiwat and D. Estrin. Direct diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor network. *Proc. ACM Mobicom Boston MA*, pages 1–12, 2000.
- [16] Y. Challal. *Réseaux de capteurs sans fil, Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport*. Université de Technologie de Compiègne, 2008.
- [17] C.Y. Chong and S.P. Kumar. Sensor networks.evolution, opportunities, and challenges. *In Proceedings of the IEEE*, 91(8) :1247–1256, 2003.
- [18] L. X. H. Dai and Q. Zhou. *Energy efficiency of mimo transmission strategies in wireless sensor networks*. International Conference on Computing, Communications and Control Technologies (CCCT), Austin, TX, USA, 2004.
- [19] A. Del-Coso, S. Savazzi, U. Spagnolini, and C. Ibars. *Virtual MIMO Channels in Cooperative Multi-hop Wireless Sensor Networks*. Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), 2004.
- [20] M. Demirbas, A. Arora, and V. Mittal. *FLOC : a fast local clustering service for wireless sensor networks*. Proceedings of Workshop on Dependability Issues in Wireless Ad Hoc Networks and Sensor Networks, Palazzo dei Congressi, Florence, Italy, 2004.
- [21] A. Diallo. *Systèmes Multi-Antennes Pour Diversité et MIMO*. Ecole doctorale des Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication. Université de Nice-Sophia Antipolis UFR Sciences, 2007.
- [22] Y. Fernandess and D. Malkhi. K-clustering in wireless ad hoc networks. *In Proceedings of the second ACM International Workshop on Principles of Mobile Computing, Toulouse*, pages 31–37, 2002.
- [23] G.J. Foschini. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas. *Bell laboratoriesb technical*, 1(2) :41–59, 1996.

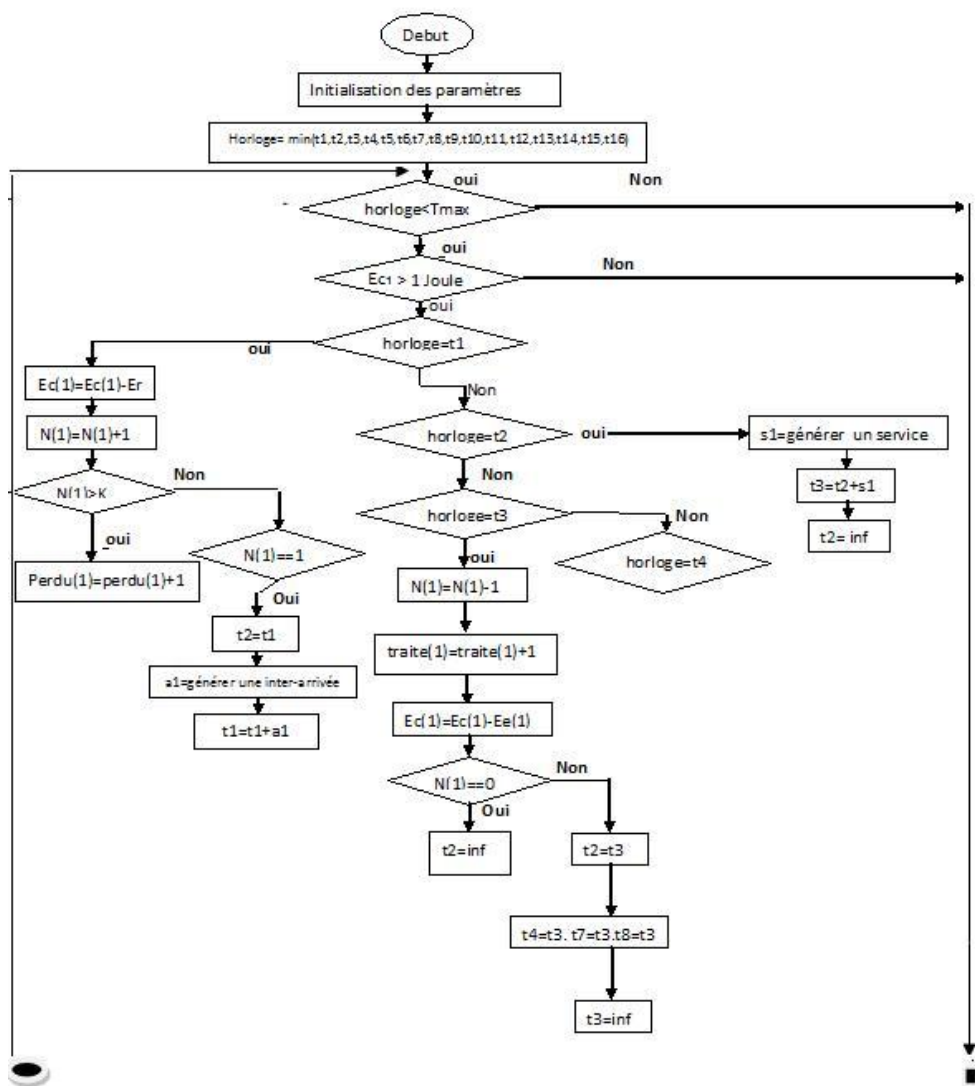
- [24] Y. Gai, L. Zhang, and X. Shan. *Aggregation in Wireless Sensor Networks*. IEEE Communications Society, WCNC Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, 2007.
- [25] E. Gelenbe and G. Pujolle. *Introduction aux réseaux de files d'attente, Collection Scientifique et technique du CNET, Edition Eyrolles, Paris, 1982*.
- [26] Gesbert, D.Shafi, M. Da shan Shiu, Smith, and P.J. Naguib. From theory to practice : an overview of mimo space-time coded wireless systems. *Selected areas in communications, IEEE*, 21(3) :281–302, 2003.
- [27] G.J.Pottie and W.J.Kaiser. *Wireless integrated network sensors*. Communications of the ACM, 2000.
- [28] A. J. Goldsmith, S. Cui, and A. Bahai. Energy-efficiency of mimo and cooperative mimo techniques in sensor networks. *IEEE J. Select. Areas. Commun*, 22(6) :1089–1098, 2003.
- [29] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. *Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks*. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.
- [30] W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE*, pages 174–185, 1999.
- [31] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. *Application specific protocol architecture for wireless microsensor networks*. IEEE Transactions on Wireless Networking, 2002.
- [32] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. *Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks*. IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.
- [33] M. Ilyas and I. Mahgoub. *Handbook of sensor networks : compact wireless and wired sensing systems*. CRC Press, 2004.
- [34] H. Jafarkhani, V. Tarokh, and A. R. Calderbank. Space-time block codes from orthogonal designs. *IEEE transactions on information theory*, 45(5) :1456–1467, 1999.
- [35] S. K. Jayaweera. Virtual mimo-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks. *IEEE transactions on wireless communications*, 5(5), 2006.
- [36] R. Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.

- [37] L. Khelladi. *Le service de routage dans les réseaux de capteurs*. Mémoire de magistère en informatique, USTHB, Alger, 2005.
- [38] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker. *Modelling data-centric routing in wireless sensor networks*. In proceedings of the IEEE infocom, 2002.
- [39] E. Larsson and P. Stoica. *Space-Time Block Coding dor Wireless Communications*. Cambridge university press, 2003.
- [40] S. Lindsey and Pegasis C.S.Raghavendra. *Power efficient gathering in sensor information systems, proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 2002*.
- [41] A. Manjeshwar and D.P. Agrwal. *APTEEN : A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks*. Proceedings of IEEE comput. Soc.16th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS-02), 2002.
- [42] A. Manjeshwar and D.P. Agrwal. Teen : A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. *Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS-01), University Cininnati, pages 2009–2015, 2001*.
- [43] T. L. Marzetta and B. M. Hochwald. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in ray- leigh at fading. *IEEE Transactions*, 45 :139–157, 1999.
- [44] M. Minoux and M. Gondran. *Graphes et algorithmes*. Collection de la direction des études et de recherches d'électricité, Paris, 1979.
- [45] T. D. Nguyen, O. Berder, and O. Sentieys. *Optimisation énergétique des transmissions MIMO cooperatives pour les réseaux de capteurs*. Ecole Nationale Supérieure de Sciences Appliquées et de Technologie,Lannion, France, 2007.
- [46] C. Pomalaza-Rez. *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. University of Oulu, Finland, 2004.
- [47] G. Pujolle and S. Fdida. *Modèles de systèmes et de réseaux, volume 1. Eyrolles Ed, Paris, 1989*.
- [48] G. Pujolle and S. Fdida. *Modèles de systèmes et de réseaux, volume 2. Edition Eyrolles, Paris, 1989*.
- [49] Q.Li, J. Aslam, and D.Rue. *Hierarchical power-aware routing in sensor networks*. In proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking, University of California, 2001.

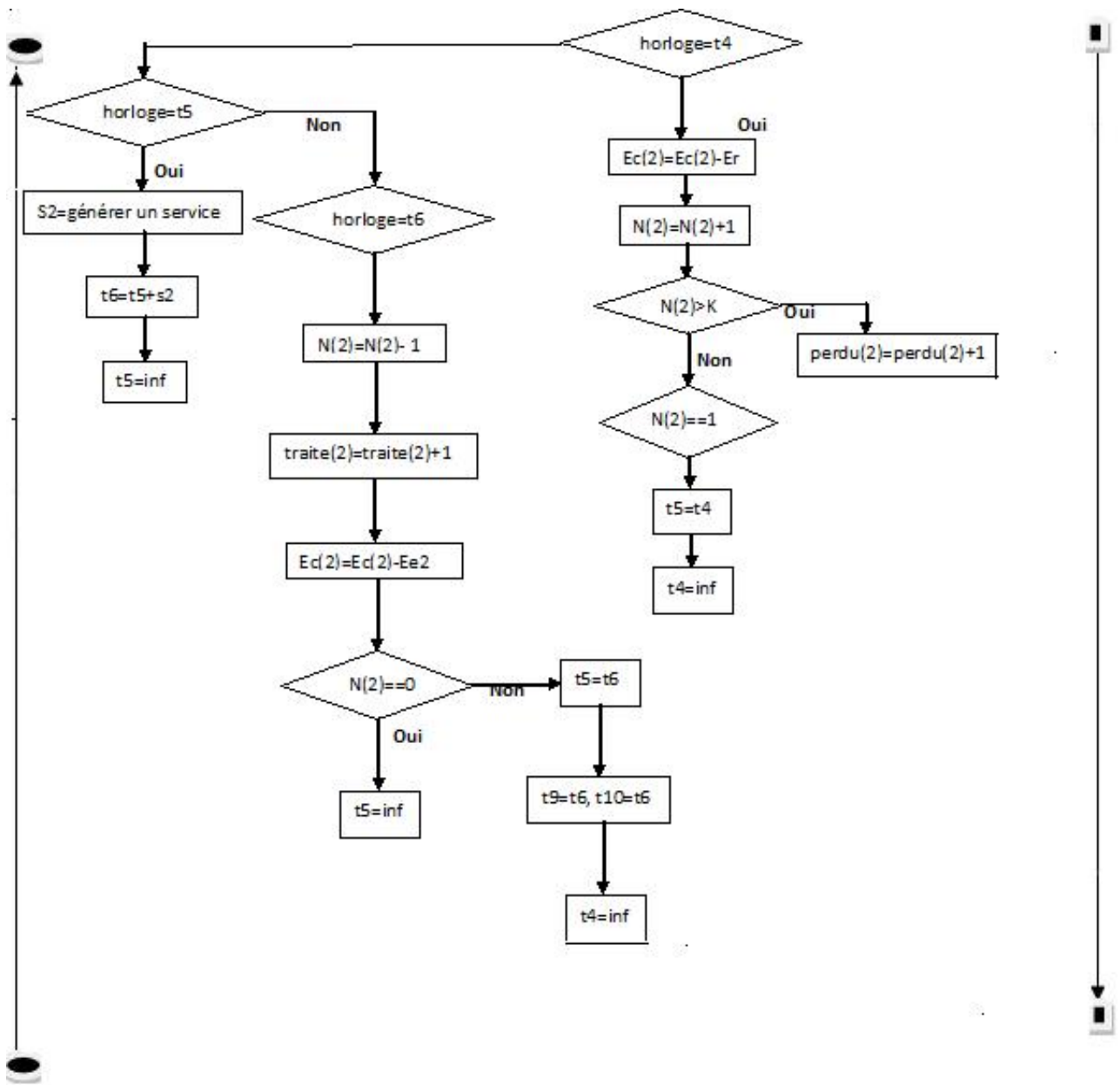
- [50] P. Rentala, R. Musunnuri, S. Gandham, and U. Saxena. *Survey on Sensor Networks*. University of Texas at Dallas, 2002.
- [51] M. Z. Siam, M. Krunz, and O. Younis. Energy-efficient clustering/routing for cooperative mimo operation in sensor networks. *in proceedings of the IEEE INFOCOM*, Brazil, 2009.
- [52] N. Thepvilojanapong. *A study on data collection and mobility control for wireless sensor networks*. Thèse de doctorat, Département d'information et Ingénierie de communication, Université de Tokyo, Japan, 2005.
- [53] D. D. Werra, T.M. Liebling, and J-F. Heche. *Recherche Operationnelle pour ingénieurs*, volume 2. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2003.
- [54] O. Younis and S. Fahmy. *HEED : A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed clustering approach for Ad Hoc sensor networks*. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004.

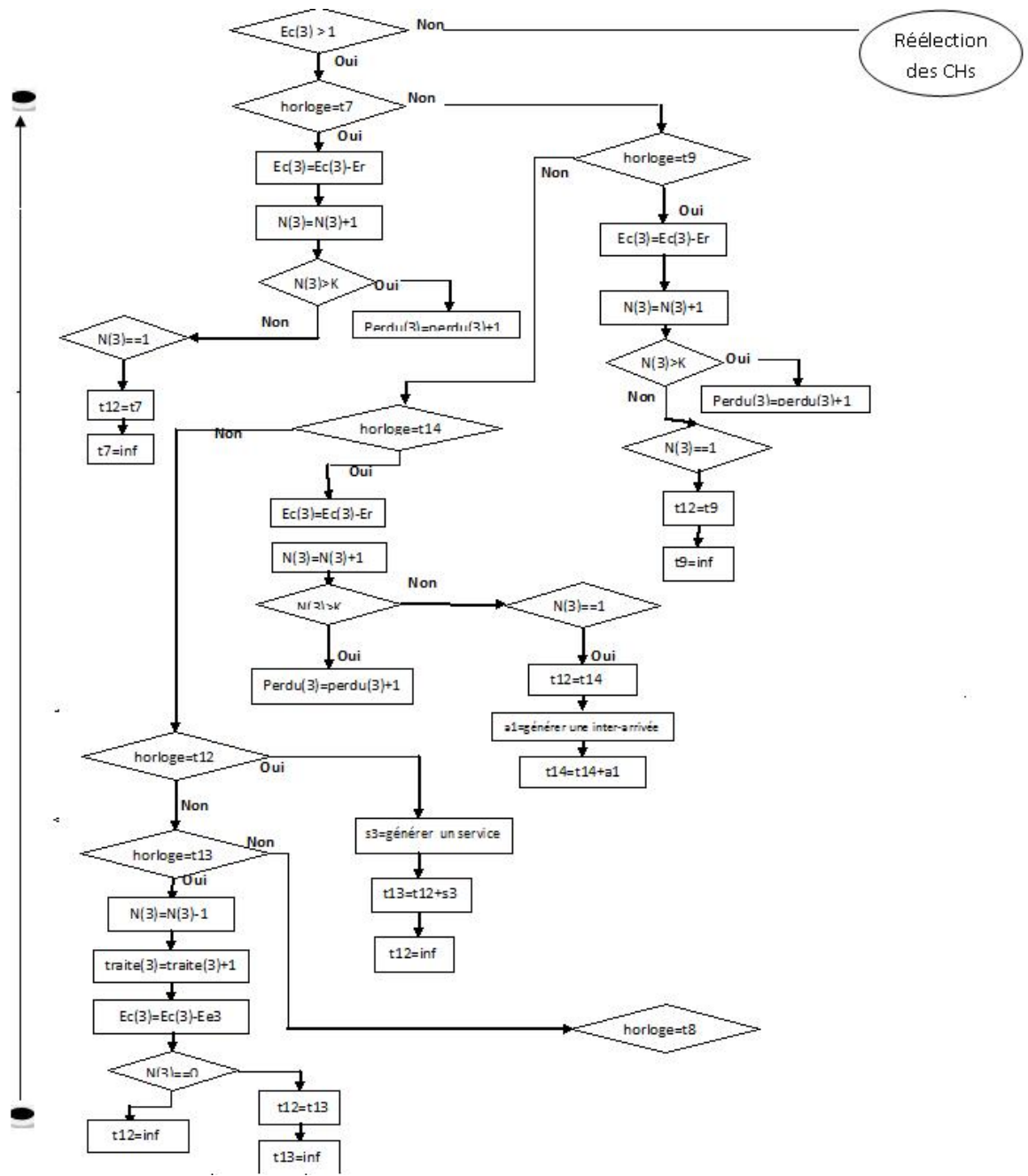
## Organigramme principale de simulation

Après l'analyse du problème, le modèle peut être schématisé par l'organigramme suivant :



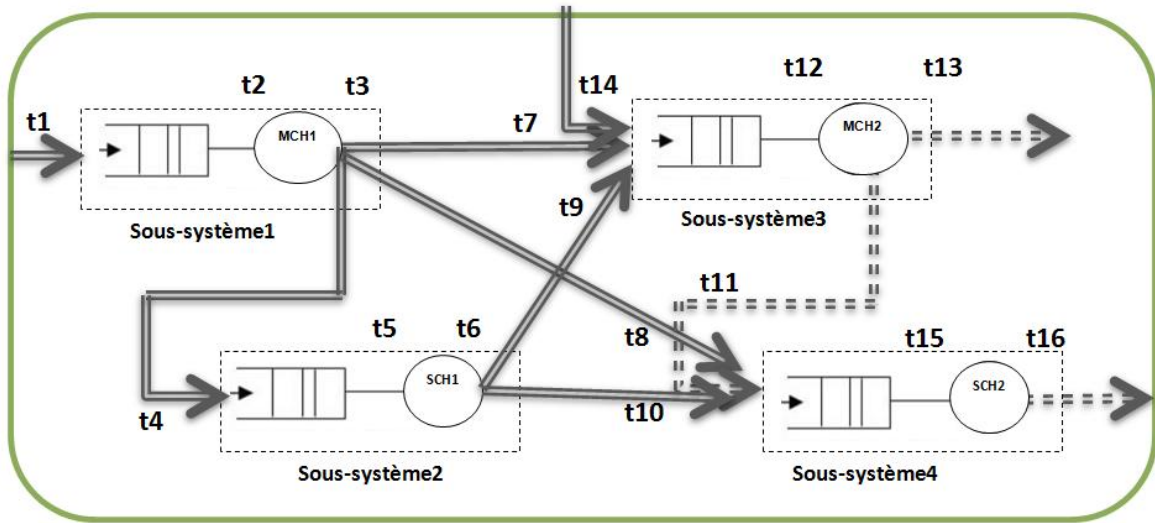








L'organigramme ci-dessus représente la communication entre deux clusters(émetteur/ récepteur) c'est pour cela qu'il se compose des quatre sous-systèmes comme suit :



### 1. Initialisation des paramètres :

- Les paramètres sont initialisés comme suit :

$N(i)$  : pour  $i=\overline{1:4}$ , le nombre de paquets dans le sous-système  $i$ ,  $N(i)=0$  : le système est initialement vide.

$t1=0$  : Instant de la première arrivée dans le système.

$traite(i)$  : le nombre de paquets traités dans chaque sous-système  $i$ ,  $traite_i=0$  : pour  $i=\overline{1:4}$ , aucun client n'a été traité;

$t_i=\text{inf}$ , pour  $i=(2,5,12,15)$  : l'instant des prochains début de services qui est une date ultérieure;

$t_i=\text{inf}$  : l'instant des prochaines fin de services est une date ultérieure,

pour  $i=(3,7,8,9,10,6,11,13,16)$ ;  $E_{amp}= 0.05$ ,  $E_{elec}= 0.001$ ,  $P_k= 100$ ,  $T_{max}=360$ ;

### 2. Initialisation de l'horloge :

- $\text{horloge}=\min(t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t8,t9,t10,t11,t12,t13,t14,t15,t16)$  : cette étape consiste à initialiser l'horloge du simulateur à l'instant du premier événement.

### 3. Explication de l'organigramme principale de simulation :

✓ horloge  $\leq T_{max}$  : tant que l'horloge n'a pas atteint le temps maximum de la simulation faire :

- $E_c(1) > 1\text{Joule}$  : tant que les énergies résiduelle des  $MCH_i > 1$  Joule,  $i=1, 3$ , c'est à dire, que les MCHs n'ont pas encore atteints 20% de leurs énergies initiales.

- **Si horloge = t1** : ceci signifie que l'événement est une arrivée d'un paquet au 1<sup>er</sup> sous système.

Alors :

- L'énergie résiduelle du *MCH1* lors de la réception du paquet sera calculée comme suit  $E_c(1)=E_c(1)-E_r$ , tel que  $E_r$  est l'énergie consommée lors de la réception des paquets transmis par ses nœuds membres.
- Augmentation du nombre de paquets dans le 1<sup>er</sup> sous système par une unité ( $N(1)=N(1)+1$ ),
- **Si** le nombre de paquet arrivés dépasse la capacité de la file du sous système 1 ( $N_1 > K$ ), **alors** le nombre de paquets perdus augmente d'une unité ( $perdu(1)=perdu(1)+1$ ), **si-non si** le paquet est seul dans le 1<sup>er</sup> sous système ( $N(1)=1$ ), **alors** il passe directement au serveur (*MCH1*) pour le transmettre ( $t2=t1$ ), autrement dit, l'instant de son début de service coïncide avec l'instant de son arrivée,
- Le fait qu'on connait la loi des inter-arrivées, on peut prévoir l'instant de la prochaine arrivée ( $a1$ =générer une inter-arrivée) qu'on additionne à l'instant de l'arrivée en cours ( $t1=t1+a1$ ).

- **Si horloge = t2** : Cela veut dire qu'il y a un début de service dans le 1<sup>er</sup> sous système

- Le fait que le paquet commence son service à l'instant  $t2$ , fait qu'il est possible de prévoir l'instant de sa fin de service qui est ( $t3=t2+s1$ ), tel que  $s1$  est une variable aléatoire générée selon la loi des durées de service,
- La mise à jour du prochain début de service est initialisée à une date ultérieure ( $t2=inf$ ), car nous ignorons l'instant du prochain début de service.

- **Si horloge = t3** : Dans cette étape, le paquet terminera son service et quittera le premier sous système.

- Alors le nombre de paquets sera diminué d'une unité ( $N(1)=N(1)-1$ ),
- Le nombre de paquets traités augmentera ainsi d'une unité ( $traite(1)=traite(1)+1$ ),
- L'énergie résiduelle diminuera ( $E_c(1)=E_c(1)-E_e(1)$ ), tel que  $E_e(1)$  est l'énergie consommée lors de la transmission du paquet du *MCH1* au *MCH2*, *SCH1* et *SCH2*,
- **Si** il reste d'autres paquets dans le 1<sup>er</sup> sous système ( $N(1) \neq 0$ ) **alors** le début de service du prochain paquet sera au moment où celui qui est entrain d'être servi quitte le sous système1 ( $t2=t3$ ). ( $t4=t3$  : forcer le passage au *SCH1*,  $t7=t3$  : forcer le passage au *MCH2*,  $t8=t3$  : forcer le passage au *SCH2*) c'est ce qui représente la duplication du paquet en trois.

- D'autre part, ( $t_3 = \text{inf}$ ), car nous ignorons l'instant de la prochaine fin de service.
- **Si horloge = t4** : Ce qui veut dire que le paquet est arrivé au 2<sup>ème</sup> sous système,
  - L'énergie résiduelle du SCH1 lors de la réception du paquet diminue ( $E_c(1) = E_c(1) - E_r$ ), tel que  $E_r$  est l'énergie consommée lors de la réception des paquets par le MCH1
  - Cela engendre l'augmentation du nombre de paquet dans le sous système2 par une unité ( $N(2) = N(2) + 1$ ),
  - **Si** le nombre de paquet dépasse la capacité de la file ( $N(2) > K$ ), **alors** on aura un paquet perdu ( $\text{perdu}(2) = \text{perdu}(2) + 1$ )
  - **sinon si** le paquet est seul dans le 2<sup>ème</sup> sous système, il passe directement au serveur (SCH1) pour le transmettre ( $t_5 = t_4$ ),
  - Du fait que nous ignorons l'instant de la prochaine arrivée alors  $t_4 = \text{inf}$ .
- **Si horloge = t5** : Ce qui veut dire qu'il y a un début de service dans le 2<sup>ème</sup> sous système.
  - Le fait que le paquet commence son service à l'instant t5, donc on peut prévoir l'instant de fin de service qui est ( $t_6 = t_5 + s_2$ ), tel que  $s_2$  est une variable aléatoire générée selon la loi des durées de service,
  - La mise à jour du prochain début de service est initialisée à une date ultérieure ( $t_5 = \text{inf}$ ), car on ne connaît pas l'instant du prochain début de service.
- **Si horloge = t6** : Dans cette étape, le paquet terminera son service et quittera le 2<sup>ème</sup> sous système.
  - Le nombre de paquets diminuera d'une unité ( $N(2) = N(2) - 1$ ),
  - Le nombre de paquets traités augmentera alors d'une unité ( $\text{traite}(2) = \text{traite}(2) + 1$ ),
  - Engendrant ainsi, la diminution de l'énergie résiduelle ( $E_c(2) = E_c(2) - E_e(2)$ ), tel que  $E_e(2)$  est l'énergie consommé par le SCH1 lors de la transmission du paquet vers SCH2 et MCH2,
  - **Si** il reste d'autres paquets dans le 2<sup>ème</sup> sous système ( $N(2) \neq 0$ ) **alors** le début de service du prochain sera au moment où ce dernier quitte le sous système ( $t_5 = t_6$ ). ( $t_9 = t_6$  : forcer le passage au MCH2), ( $t_{10} = t_6$  : forcer le passage au SCH2) représente la duplication du paquet en deux.
- **Si horloge = t7** : ce qui veut dire qu'un paquet a été transmis par le MCH1 et qu'il est arrivé au 3<sup>ème</sup> sous système.
  - L'énergie résiduelle du MCH2 diminuera ( $E_c(3) = E_c(3) - E_r$ ),
  - Augmentation du nombre de paquets dans le 3<sup>ème</sup> sous système par une unité ( $N(3) = N(3) + 1$ ),
  - **Si** le nombre de paquets dépasse la capacité de la file ( $N(3) > K$ ), **alors** un paquet sera

perdu ( $\text{perdu}(3)=\text{perdu}(3)+1$ ),

- **Sinon si** le paquet est seul, **alors** il passe directement au serveur *MCH2* ( $t_{12}=t_7$ )
- **Si horloge = t9** : Le paquet a été transmis par le *SCH1* et est arrivé au 3<sup>ème</sup> sous système.
- L'énergie résiduelle du *MCH2* diminuera ( $E_c(3)=E_c(3)-E_r$ ),
- Augmentation du nombre de paquets dans le 3<sup>ème</sup> sous système par une unité ( $N(3)=N(3)+1$ ),
- **Si** le nombre de paquets dépasse la capacité de la file ( $N(3)>K$ ), **alors** on aura un paquet perdu ( $\text{perdu}(3)=\text{perdu}(3)+1$ ),
- **Sinon si** le paquet est seul, **alors** il passe directement au serveur *MCH2* ( $t_{12}=t_9$ ).
- **Si horloge = t14** : ceci signifie que l'événement est une arrivée d'un paquet au 3<sup>ème</sup> sous système.

Alors :

- L'énergie résiduelle du *MCH2* lors de la réception du paquet est ( $E_c(3)=E_c(3)-E_r$ ),
- Augmentation du nombre de paquets dans le 3<sup>ème</sup> sous système par une unité ( $N(3)=N(3)+1$ ),
- **Si** le nombre de paquets arrivés dépasse la capacité de la file du 3<sup>ème</sup> sous système ( $N_3 > K$ ), **alors** le nombre de paquet perdu augmente d'une unité ( $\text{perdu}(3)=\text{perdu}(3)+1$ ), **sinon si** le paquet est seul dans le sous-système3 ( $N(3)=1$ ), **alors** il passe directement au serveur (*MCH3*) pour le transmettre ( $t_{12}=t_{14}$ ), autrement dit, l'instant de son début de service coïncide avec l'instant de son arrivée,
- Le fait qu'on connaît la loi des inter-arrivées, nous pouvons prévoir l'instant de la prochaine arrivée ( $a_2$ =générer une inter-arrivée) qu'on additionne à l'instant de l'arrivée en cours ( $t_{14}=t_{14}+a_1$ ).
- **Si horloge = t12** : Dans cette étape, il y a un début de service dans le 3<sup>ème</sup> sous système.
- le fait que le paquet commence son service, nous pouvons prévoir l'instant de sa fin de service ( $t_{13}=t_{12}+s_3$ ), tel que  $s_3$  est une variable aléatoire générée selon la loi des durées de service,
- La mise à jour de la prochaine arrivée est initialisée à une date ultérieure ( $t_{12}=\text{inf}$ ), car on ne connaît pas l'instant du prochain début de service.
- **Si horloge = t13** : Le paquet terminera son service et quittera le 3<sup>ème</sup> sous système.
- Alors, le nombre de paquets diminue d'une unité ( $N(3)=N(3)-1$ ),
- Ce qui engendre l'augmentation du nombre de paquets traités d'une unité ( $\text{traite}(3)=\text{traite}(3)+1$ )
- Ainsi, l'énergie résiduelle du *MCH2* diminue ( $E_c(3)=E_c(3)-E_e(3)$ ), tel que  $E_e(3)$  est l'énergie consommée lors de la transmission du paquet vers le *SCH2*.

- **Si** il reste d'autres paquets dans le 3<sup>eme</sup> sous système ( $N(3) \neq 0$ ), **alors** le début de service du prochain paquet sera au moment où ce dernier quitte le 3<sup>eme</sup> sous système,
- D'autre part, la mise à jour de la prochaine fin de service est initialisée à une date ultérieure ( $t_{13} = \text{inf}$ )
- Et **si** il y a plus de paquet ( $N(3) = 0$ ), **alors** on bloc le serveur *MCH2* ( $t_{12} = \text{inf}$ )
- Si horloge = t8** : Dans cette étape, un paquet est transmis par le *MCH1* et est arrivé au 4<sup>eme</sup> sous système.
  - L'énergie résiduelle du *SCH2* diminue, du fait qu'il a reçu le paquet ( $E_c(3) = E_c(3) - E_r$ ),
  - Augmentation du nombre de paquets dans le 4<sup>eme</sup> sous système ( $N(4) = N(4) + 1$ ),
  - **Si** le nombre de paquets dépasse la capacité de la file ( $N(4) > K$ ), **alors** il y aura un paquet perdu ( $\text{perdu}(4) = \text{perdu}(4) + 1$ ),
  - **Sinon si** le paquet est seul **alors** il passe directement au serveur *SCH2* ( $t_{15} = t8$ ).
  - Du fait que nous ignorons l'instant de la prochaine arrivée au 4<sup>eme</sup> sous système alors on l'initialise à une date ultérieure ( $t8 = \text{inf}$ ),
- Si horloge = t10** : Dans cette étape, le paquet est transmis par *SCH1* au 4<sup>eme</sup> sous système.
  - L'énergie résiduelle du *SCH2* diminue ( $E_c(3) = E_c(3) - E_r$ ),
  - Augmentation du nombre de paquets dans le 4<sup>eme</sup> sous système ( $N(4) = N(4) + 1$ ),
  - **Si** le nombre de paquets dépasse la capacité de la file ( $N(4) > K$ ), **alors** un paquet sera perdu ( $\text{perdu}(4) = \text{perdu}(4) + 1$ ),
  - **Sinon si** le paquet est seul **alors** il passe directement au serveur *SCH2* ( $t_{15} = t8$ ).
  - $t_{10} = \text{inf}$  la prochaine arrivée au 4<sup>eme</sup> sous système alors on l'initialise à une date ultérieure.
- Si horloge = t11** : Dans cette étape, le paquet est transmis par *MCH2* vers le 4<sup>eme</sup> sous système.
  - L'énergie résiduelle du *SCH2* diminue, car il a reçu un paquet de donnée ( $E_c(4) = E_c(4) - E_r$ ),
  - Augmentation du nombre de paquets dans le 4<sup>eme</sup> sous système par une unité ( $N(4) = N(4) + 1$ ),
  - **Si** le nombre de paquets dépasse la capacité de la file ( $N(4) > K$ ), **alors** le nombre de paquets perdus augmente d'une unité ( $\text{perdu}(4) = \text{perdu}(4) + 1$ ),
  - **Sinon si** le paquet est seul, **alors** il passe directement au serveur *SCH2* ( $t_{15} = t_{11}$ ),
  - $t_{11} = \text{inf}$  l'instant de la prochaine arrivée au 4<sup>eme</sup> sous système est initialisée à une date ultérieure.
- Si horloge = t15** : Dans cette étape, le paquet commence son service dans le 4<sup>eme</sup> sous



système.

- Du fait que le paquet commence son service, donc on peut prévoir l'instant de sa fin de service ( $t_{16}=t_{15}+s_4$ ),  $s_4$  est une variable aléatoire générée selon la loi des durées de service.
- La mise à jour de la prochaine arrivée est initialisée à une date ultérieure ( $t_{15}=\text{inf}$ ).
- **Si horloge = t16** : Dans cette étape le paquet terminera son service et quittera le 4<sup>ème</sup> sous système.
- Le nombre de paquets diminuera d'une unité ( $N(4)=N(4)-1$ ),
- Ainsi, le nombre de paquets traités augmentera d'une unité ( $\text{traite}(4)=\text{traite}(4)+1$ ),
- Et l'énergie résiduelle diminuera ( $E_c(4)=E_c(4)-E_e(4)$ ), tel que  $E_e(4)$  est l'énergie consommée par le *SCH2*.
- **Si** il reste d'autres paquets ( $N(4) \neq 0$ ), **alors** le début de service du prochain paquet sera au moment où celui qui est entrain d'être servis dernier quitte le sous système ( $t_{15}=t_{16}$ ),
- Ainsi, l'instant de la prochaine fin de service sera initialisé à une date ultérieure ( $t_{16}=\text{inf}$ )
- **Si** il y a pas de paquet dans le sous système ( $N(4)=0$ ), **alors** on bloc le serveur ( $t_{15}=\text{inf}$ ).
- **horloge = min(t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t8,t9,t10,t11,t12,t13,t14,t15,t16)** : Cette étape consiste à faire incrémenter l'horloge du simulateur, en lui affectant l'instant du plus proche événement.

## Algorithme de Dijkstra[44]

- **Donnée** :

$R(X, V, D)$  un réseau, avec  $D_{ij} \geq 0$  est la distance entre les nœuds.

- **Résultat** :

$\lambda_j$  : longueur minimale du chemin entre  $s$  et  $j$ .

- **Initialisation** :

1. Poser  $S = s$ , et  $\lambda_s = 0$ ;

Pour tout  $j \in \bar{S} = X \setminus \{s\}$  :

$$\lambda_j = \begin{cases} D_{ij} & \text{si } j \in J^+(s); \\ \infty & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.3)$$

2. Selectionner  $k \in \bar{S}$ , tel que  $\lambda_k = \min_{j \in \bar{S}} \lambda_j$   
Si  $\bar{S} = \emptyset$ , Fin, sinon aller à (3) ;
3. Mise à jour des distances  
Pour tout  $j \in \Gamma^+(k)$  et  $j \in \bar{S}$  faire :  
$$\lambda_j = \min\{\lambda_j, \lambda_k + D_{kj}\}$$
retourner à 2

## Résumé

---

*La technologie MIMO est l'une des techniques de transmission/ réception jugée performante en terme d'optimisation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil.*

*Dans ce mémoire, afin de réaliser un meilleur gain énergétique, nous avons présenté notre proposition nommée "ANCAEE-MIMO" qui adapte la technique MIMO sur un protocole hiérarchique ANCAEE et consiste à élire deux CHs dans chaque cluster à savoir (MCH : Maître Cluster Head et SCH Secondaire Cluster Head), au lieu, d'un seul, et cela pour que les deux CHs coopèrent pour former un système MIMO( $2 \times 2$ ).*

*Nous nous sommes intéressés par la suite à la modélisation de la communication "intra et inter" - clusters par application des réseaux de files d'attente, et en raison de la difficulté de réaliser l'étude analytique de ce type de réseau, nous avons fait appel à l'approche simulation.*

*L'évaluation de performance effectuée sur notre proposition montre l'influence de la portée de transmission, la taille du paquet ainsi que le taux de service sur l'énergie résiduelle du réseau. Finalement, une étude comparative a été faite entre "ANCAEE-MIMO" et LEACH. Les résultats obtenus montrent que "ANCAEE-MIMO" assure une réduction considérable de l'énergie consommée, et ce, grâce à l'utilisation de la communication multi-sauts et la technique de transmission/réception MIMO.*

---

**Mots clés** : Réseaux de capteurs sans fil, Stratégies MIMO coopératives, Economie d'énergie, Réseaux de files d'attente, Evaluation de performances.

---

## Abstract

---

*The MIMO technology is one of the techniques of transmission/reception considered to be powerful in energy term of optimization in the wireless sensors networks.*

*In this memory, in order to carry out a better energy profit, we presented our named proposal "Ancaee-mimo" which adapts technique MIMO on a hierarchical protocol ANCAEE and consists in electing two CHs in each cluster with knowing (MCH :Maitre Cluster Head and Secondary SCH Cluster Head), with the place, of only one, and that so that both CHs cooperate to form a system MIMO( $2 \times 2$ ).*

*We were interested thereafter in modeling of the communication "intra and inter"-clusters by the queuing networks, and considering the difficulty of the analytical study of this type of network for this reason, we used the approach simulation.*

*The evaluation of performance carried out on our proposal shows the influence of the range of transmission, the size of the packet as well as the service rate on the residual energy of the network. Finally, a comparative study was made between "ANCAEE-MIMO" and LEACH, the results obtained show that "ANCAEE-MIMO" ensures a considerable reduction of the energy consumption and this grace has the use of the multi-hop communication and the technique of transmission/réception (MIMO).*

---

**Keywords :** *Wireless sensors networks, Cooperative MIMO strategie, Energy saving, Queuing networks, Evaluation of performances.*

---