

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

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Mathématiques

*Mémoire de Master*

Filière : Mathématiques

Spécialité : Recherche Opérationnelle

## Thème

---

Modélisation d'un réseau de capteurs sans fil multi-sauts

---

Présenté par : HACHEB RABIA

Devant le jury composé de :

Président	<i>M<sup>r</sup></i> DEMMOUCHE Nacer	MCB	U.A.M.O. Bouira.
Encadreur	<i>M<sup>r</sup></i> IFTISSEN El-Ghani	MAA	U.A.M.O. Bouira.
Examineurs	<i>M<sup>r</sup></i> BOUGHANI L'Hadi	MAA	U.A.M.O. Bouira.
	<i>M<sup>r</sup></i> HAMDOUNI Omar	MAA	U.A.M.O. Bouira.

2020/2021



## *Remerciements*



*Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant, celui qui m'a donné la santé, le temps et la force pour mettre en oeuvre ce mémoire de fin d'étude.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements chaleureux au directeur de ce mémoire Mr. IFTISSEN El-Ghani, et son acceptation d'être le directeur de mon mémoire et m'avoir permis de mener à bien ce travail.*

*Je le remercie pour sa patience et son dévouement à travailler avec moi et à son aider et pour tout. Merci beaucoup.*

*Je remercie particulièrement mes gentils et merveilleux parents, mon père Rabah, ma mère Mbarka, et mes chers frères et soeurs : Soumaya, Hayet, Mohamed Amine, Nour El-Huda, Hadil et ma belle Asma, qui m'ont apporté un soutien moral et intellectuel tout au long de mes études.*

*Une salutation parfumée qui porte toutes les significations d'appréciation et de gratitude et Grand merci à Mr L. BOUGHANI et Mme L. ALEM pour leur aide.*

*Un Merci chaleureux portant toute ma gratitude à la secrétaire de notre département cher Sabrina, pour m'avoir aidé et soutenu à tout moment. Je remercie également les membres du jury, Mr N. DEMMOUCHE président et les examinateurs : Mr L. BOUGHANI et Mr O. HAMDOUNI de nous honorer d'examiner et d'évaluer mon travail.*

*J'exprime mes sincères remerciements et gratitude à tous ceux qui continuent d'illuminer mon chemin, à tous ceux qui nous ont appris une connaissance utile, des enseignants aux professeurs d'université.*

---

---

## *Dédicaces*

*Avec un énorme plaisir, un coeur ouvert et une immense joie, je  
dédie ce modeste travail à :*

*- Mon Père **Rabeh** et Ma Mère **Mbarka** "ma Mère tu m'as  
donné la vie, la tendresse, l'amour et le courage de réussir, mon  
père, la plus belle personne et le plus grand soutien pour moi dans  
cette vie.*

*En témoignage d'honneur, je vous offre cet humble mémoire  
pour vous remercier de vos sacrifices et de l'affection dont vous  
n'avez toujours entourée" .*

*-Mes chers frères et soeurs : Soumaya, Hayet, Mohamed Amine,  
Nour El-Huda, Hadeel et ma beau Asma pour leur encouragement  
contenu et leur soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma  
haute gratitude.*

*Mes chers amis et à ceux qui m'aimaient .*

**HACHEB RABIA**

---

# TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	v
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans-fil	4
Généralités sur les réseaux de capteurs sans-fil	4
1.1 Histoire des réseaux de capteurs . . . . .	5
1.2 C'est quoi un réseau de capteurs sans fil? . . . . .	6
1.2.1 Réseau de capteurs . . . . .	7
1.2.2 Noeud de capteur . . . . .	8
1.2.3 Architecture de réseau . . . . .	8
1.3 Topologies de réseau dans RCSF . . . . .	10
1.3.1 Topologie en étoile . . . . .	11
1.3.2 Topologie arborescente . . . . .	11
1.3.3 Le réseau en anneau . . . . .	12
1.3.4 Le réseau en bus . . . . .	12
1.3.5 Topologie maillée . . . . .	13

1.4	Caractéristiques et Limites des réseaux de capteurs . . . . .	14
1.4.1	Caractéristiques . . . . .	14
1.4.2	Limites . . . . .	14
1.5	Classification des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	15
1.5.1	RCSF statique et mobile . . . . .	15
1.5.2	RCSF déterministe et non déterministe . . . . .	16
1.5.3	Station de base unique et station de base multiple RCSF . . . . .	16
1.5.4	Station de base statique et station de base mobile RCSF . . . . .	16
1.5.5	RCSF à un et à plusieurs sauts . . . . .	16
1.5.6	RCSF auto-reconfigurable et non auto-configurable . . . . .	17
1.5.7	RCSF homogène et hétérogène . . . . .	17
1.6	Domaines Applications des RCSF . . . . .	17
1.6.1	Applications militaires . . . . .	18
1.6.2	Applications dans l'environnement . . . . .	19
1.6.3	Agriculture . . . . .	20
1.6.4	Applications dans le domaine médical . . . . .	20
1.6.5	Applications dans les maisons . . . . .	21
1.6.6	Autres applications commerciales . . . . .	23
1.7	Protocoles de routage dans les RCSFs . . . . .	24
1.7.1	Pile protocole . . . . .	24
1.8	Le routage dans les RCSF . . . . .	26
1.8.1	Consommation d'énergie . . . . .	26
1.8.2	Passage à l'échelle . . . . .	26
1.8.3	Robustesse . . . . .	27
1.8.4	Topologie . . . . .	27
1.8.5	Application . . . . .	28
1.8.6	Adressage . . . . .	28
1.9	Métriques de routage . . . . .	28
1.9.1	Nombre de sauts minimal . . . . .	29
1.9.2	Energie . . . . .	29

<b>2</b>	<b>Modélisation du problème de maximisation de la durée de vie d'un RCSF</b>	<b>32</b>
	<b>Modélisation du problème de maximisation de la durée de vie d'un RCSF</b>	<b>32</b>
2.1	Routage pour la durée de vie maximale du système . . . . .	33
2.2	Description du problème et modélisation . . . . .	34
2.3	L'application . . . . .	38
	<b>Conclusion générale</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>48</b>

---

# TABLE DES FIGURES

1.1	WSN	7
1.2	les composants de RCSF	8
1.3	Architecture de réseau	9
1.4	réseaux de capteur sans fil d'un saut	9
1.5	réseaux de capteur sans fil multi-sauts	10
1.6	WSN	10
1.7	WSN	11
1.8	Topologie en étoile	11
1.9	Topologie arborescente	11
1.10	Topologie en anneau	12
1.11	Topologie en anneau bus	12
1.12	Topologie en maillée	13
1.13	Applications militaires	18
1.14	Détection d'incendies de forêts	19
1.15	Application Agriculture	20
1.16	Application rcsf dans le domaine médical	20
1.17	Application rcsf dans les maisons	21
1.18	pile protocole dans les RCSF	24
2.1	Exemple de RCSF	34

2.2	Exemple de RCSFs de 02 noeuds . . . . .	38
2.3	Exemple de RCSFs de 04 noeuds . . . . .	40

---

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

RCSF	Réseaux de capteurs sans fils.
WSN	Wireless Sensor Network.
VLSI	Very-Large-Scale Integration .
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems.
BLR	Boucle locale radio.
DSN	Distributed Sensor Network.
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
SOSUS	SOund SOrveillance System.
MANET	Mobile Ad Hoc Network.
CTR	Computing Tabulating Recording Company.

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil connaissent un succès croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles en raison de leurs divers avantages. Cette technologie a su s'imposer comme un acteur majeur des architectures réseaux actuelles. Un réseau de capteurs est un réseau composée de capteurs, d'unités de calcul et d'éléments de communication dans le but d'enregistrer, de surveiller et d'interagir avec un événement ou un phénomène. Ces phénomènes peuvent être liés au monde physique, à un environnement industriel, à un système biologique, etc. Si le système de communication est mis en œuvre dans le réseau de capteurs à l'aide d'une technologie sans fil, alors le réseau est appelé réseau de capteurs sans fil (RCSF) ou simplement WSN (de l'anglais, Wireless Sensor Network). Les noeuds des réseaux de capteurs peuvent comporter différents types de capteurs, tels que les capteurs sismiques, thermiques, visuels, infrarouges, acoustiques et radar, qui sont capables de surveiller une grande variété de phénomènes ambiants comme la température, l'humidité, le mouvement des véhicules, la pression, la présence ou absence de certains types d'objets...

Le concept de micro-capteurs interconnectés via un support sans fil ouvre la voie vers de nombreux et nouveaux domaines d'applications qui peuvent être catégorisés en des domaines touchant au militaire, à l'environnement, la santé, les milieux ambiants (maisons) ainsi qu'à d'autres applications commerciales. Ces capteurs avancés peuvent être utilisés comme un pont entre le monde physique et le monde numérique. Les capteurs sont utilisés dans de

nombreux appareils, industries, machines et environnements et aident à éviter les pannes d'infrastructure, les accidents, la conservation des ressources naturelles, la préservation de la faune, l'augmentation de la productivité, la sécurité, etc. Avec l'aide de la technologie moderne des semi-conducteurs, on peut développer des microprocesseurs plus puissants et de taille nettement plus petite par rapport aux produits de la génération précédente. Cette miniaturisation des technologies de traitement, de calcul et de détection a conduit à des capteurs, contrôleurs et actionneurs minuscules, de faible puissance et bon marché [3].

La consommation d'énergie est un problème majeur avec les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) vu que les noeuds de capteurs alimentés par batterie sont fortement limités dans l'alimentation électrique. Dès lors, la question cruciale est : "Comment prolonger la durée de vie du réseau?" Par conséquent, maximiser la durée de vie du réseau en minimisant la consommation d'énergie est un défi majeur dans RCSF. Les capteurs ne peuvent pas être facilement remplacés ou rechargés en raison de leur déploiement personnalisé dans un environnement dangereux.

Nous allons modéliser le problème de la durée de vie de RCSF. L'accent est principalement mis sur la puissance qui doit être envoyée ou reçue pour chaque produit, c'est-à-dire que la puissance n'est pas la même pour tous les produits, nous concentrons également sur la modélisation linéaire qui peut être utilisée pour maximiser la durée de vie du réseau qui est le temps jusqu'à ce que le réseau se sépare en raison d'une défaillance de la batterie du noeud.

Chang et Tassiulas [17] ont modélisé le problème de la consommation de l'énergie dans un RCSF comme un problème de programmation linéaire et l'objectif était de maximiser la durée de vie du réseau qui est égale au temps écoulé jusqu'à la coupure du réseau en raison de l'épuisement de l'énergie de l'un des capteurs du réseau.

Chang et Tassiulas [17] ont considéré un réseau où les capteurs collectent différents types de données qu'ils transmettent à des noeuds spéciaux (appelés stations de base) qui s'occupent de la collecte de ces données. Dans leur travail, ils ont considéré que l'énergie nécessaire pour transmettre ou recevoir les données d'un certain type est la même. Dans ce travail, on considère le cas où l'énergie pour transmettre ou recevoir les données diffère selon le type de données. Comme dans [17], on modélise le problème de la maximisation de la durée de

vie du réseau comme un programme linéaire et on donne quelques exemples d'illustration du modèle. Ce mémoire est organisé en trois chapitres en plus d'une introduction et d'une conclusion. Dans le premier chapitre, on donne une présentation générale des réseaux de capteurs sans fil, leur structures et leur domaines d'application. Dans le deuxième chapitre on présente la notion de protocole de routage dans les RCSFs. Enfin, dans le dernier chapitre, qui comprend l'objectif principal de ce mémoire, on modélise le problème de maximisation de la durée de vie d'un RCSF comme un programme linéaire.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL

### **Introduction**

Avec le développement rapide des systèmes électroniques et de communication sans fil, la technologie des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) est devenue une révolution scientifique dans le domaine des communications sans fil, capable de mesurer de grandes quantités de données environnementales telles que la température, la pression, la vitesse du vent, l'humidité... sans intervention humaine. Il comprenait également des règlements qui ont ouvert la voie à la création d'une nouvelle génération d'applications environnementales et de systèmes de surveillance. Météo, contrôle sanitaire, inspection des locaux, des installations et de la sécurité. Détection et découverte d'intrusion dans la sécurité des bâtiments. Plusieurs domaines de recherche sont liés au RCSF : énergie, localisation, mobilité, qualité de service, sécurité, gestion des réseaux (au sein des réseaux)...

## 1.1 Histoire des réseaux de capteurs

Bien que l'intérêt et la recherche rapide dans les domaines RCSF ne se soient manifestés que récemment, l'utilisation de capteurs pour des services spécialisés n'est pas nouvelle. Pendant la guerre froide, des sous-marins soviétiques silencieux ont été découverts en déployant un système de surveillance acoustique (SOSUS)[9], développé par l'armée américaine dans les années 1950 pour détecter et suivre les sous-marins soviétiques. Ce réseau utilisait des capteurs acoustiques immergés des hydrophones répartis dans les océans Atlantique et Pacifique[1]. Ces systèmes ont maintenant été certifiés par la (NOAA) pour détecter les événements dans les océans. Parallèlement, des réseaux de radars de défense aérienne ont été développés à l'aide de capteurs[9].

Faisant écho aux investissements réalisés dans les années 1960 et 1970 pour développer le matériel de l'internet d'aujourd'hui, la (DARPA) des États-Unis a lancé le programme (DSN) en 1980 pour explorer officiellement les défis de la mise en oeuvre de capteurs distribués/sans fil. Avec la naissance de DSN et sa progression dans le monde universitaire grâce à des universités partenaires telles que l'Université Carnegie Mellon <sup>A</sup> et le Massachusetts Institut of Technology Lincoln Labs <sup>B</sup>, la technologie a rapidement trouvé sa place dans les universités et la recherche scientifique civile.

Les gouvernements et les universités ont finalement commencé à utiliser les RCSF pour des applications telles que la surveillance de la qualité de l'air, la détection des incendies de forêt, la prévention des catastrophes naturelles, les stations météorologiques et la surveillance structurelle. Puis, lorsque les étudiants en génie ont fait leur entrée dans le monde de l'entreprise des géants de la technologie d'aujourd'hui, comme IBM <sup>C</sup> et Bell Labs <sup>D</sup>, ils ont

---

A. L'université Carnegie Mellon est une université privée spécialisée en recherche située à Pittsburgh (Pennsylvanie). Elle fut créée en 1967 par la fusion du institut de technologie Carnegie et l'institut de recherche industrielle Mellon. Ses programmes en sciences politiques, en informatique, en économie et gestion, en électronique et en théâtre sont considérés parmi les meilleurs aux États-Unis.

B. Le Laboratoire Lincoln du Massachusetts Institute of Technology, situé à Lexington, Massachusetts, est un centre de recherche et de développement du département de la défense des États-Unis.

C. International Business Machines Corporation, connue sous le sigle IBM, est une société multinationale américaine présente dans les domaines du matériel informatique, du logiciel et des services informatiques. La société est née le 16 juin 1911 de la fusion de la Computing Scale Company et de la Tabulating Machine Company sous le nom de CTR.

D. Nokia Bell Labs la branche de recherche renommée de Nokia, Bell Labs innove les technologies qui sous-tendent les réseaux de communication et façonnent la société future.

commencé à promouvoir l'utilisation des RCSF dans les applications industrielles lourdes telles que la distribution d'énergie, le traitement des eaux usées et l'automatisation d'usines spécialisées[1].

Les progrès récents des techniques de microfabrication ont permis de produire de petits noeuds pouvant accueillir plusieurs capteurs et ayant des capacités de traitement et de communication raisonnables. De plus, le développement de normes de réseau sans fil avec une sécurité maximale, une stabilité et un délai minimal a conduit à la propagation du WSN dans le domaine du contrôle et de la surveillance dans un territoire inédit. L'utilisation de WSN augmente de façon exponentielle en raison de fonctionnalités telles que : l'évolutivité, l'adaptabilité, la commodité, la mobilité, l'accessibilité, le faible coût...[9]

## 1.2 C'est quoi un réseau de capteurs sans fil ?

Un réseau de capteurs est une structure composée de capteurs, d'unités de calcul et d'éléments de communication dans le but d'enregistrer, de surveiller et d'interagir avec un événement ou un phénomène.

Ces phénomènes peuvent être liés à n'importe quoi, comme le monde physique, un environnement industriel, un système biologique ou une configuration de technologie de l'information (TI), tandis qu'un dispositif de contrôle ou de surveillance peut être une application de consommation gouvernementale, civile, militaire ou industrielle. Lorsque ces réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour la télédétection, la télémétrie médicale, la collecte de données...

Une autre définition est qu'il s'agit d'un réseau dédié à un grand nombre de noeuds, qui sont de minuscules capteurs capables de collecter et de transmettre des données de manière indépendante. Il n'est pas nécessaire de prédéterminer la position de ces noeuds. Ils peuvent être répartis aléatoirement dans une zone géographique, appelée « champ de captage » correspondant au terrain respectif du phénomène capté.

Un réseau de capteurs typique se compose de capteurs, d'une unité de contrôle et d'un système de communication. Si le système de communication dans un réseau de capteurs est mis en œuvre à l'aide d'un protocole sans fil, alors les réseaux sont appelés réseaux de capteurs

sans fil ou simplement RCSF[3].

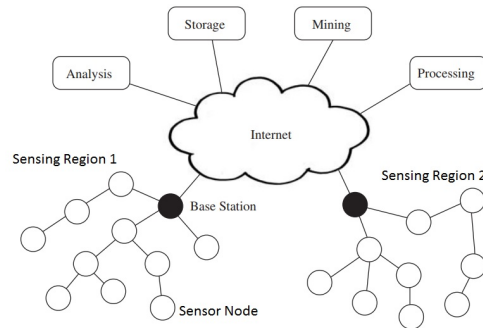


FIGURE 1.1 – WSN

Selon les technologues et les chercheurs, les réseaux de capteurs sans fil en tant qu'entité sont une technologie importante pour le XXIe siècle. Les développements récents des capteurs MEMS (système micro électromécanique) et de la communication sans fil ont permis des capteurs bon marché, à faible consommation, minuscules et intelligents, qui peuvent être déployés dans une vaste zone et peuvent être interconnectés via des liaisons sans fil et internet pour diverses applications civiles et militaires. Un réseau de capteurs sans fil se compose de noeuds de capteurs qui sont déployés en haute densité et souvent en grande quantité et prennent en charge la détection, le traitement des données, l'informatique embarquée et la connectivité[3].

Un réseau de capteurs sans fil typique peut être divisé en deux. Elles sont :

- Réseau de capteurs.
- Noeud de capteur.

### 1.2.1 Réseau de capteurs

Un réseau composé de noeuds de capteurs interconnectés qui échangent des données sensibles par communication sans fil ou sans fil[14]. Un système de communication se compose d'un système radio, généralement une radio à courte portée, pour envoyer et recevoir des données[3].

### 1.2.2 Noeud de capteur

Un dispositif composé de capteur (anthropomorphes) et d'actionneur (Moteurs) en option avec des capacités de traitement des données de capteur et de mise en réseau.

Un noeud de capteur est constitué d'un grand nombre de noeuds du même type (noeuds de détection), qui sont répartis dans l'espace et coopèrent entre eux[14]. Malgré son nom, un noeud de capteur comprend non seulement le composant de détection, mais également d'autres fonctionnalités importantes telles que les unités de traitement, de communication et de stockage. Avec toutes ces fonctionnalités, composants et améliorations, un noeud de capteur est responsable de la collecte des données du monde physique, de l'analyse du réseau, de la liaison des données et de l'intégration des données d'un autre capteur avec ses propres données[3].

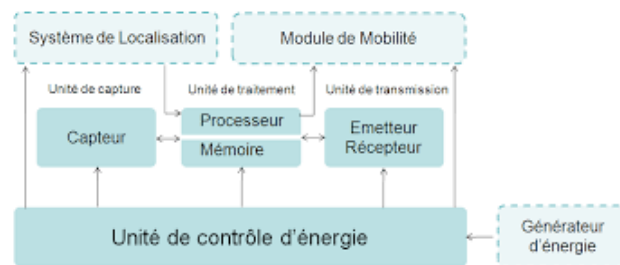


FIGURE 1.2 – les composants de RCSF

### 1.2.3 Architecture de réseau

Lorsqu'un grand nombre de noeuds de capteurs sont déployés dans une grande zone pour surveiller en coopération un environnement physique, la mise en réseau de ces noeuds de capteurs est tout aussi importante. Un noeud de capteur dans un RCSF communique non seulement avec d'autres noeuds de capteur, mais également avec une station de base (BS) en utilisant une communication sans fil.

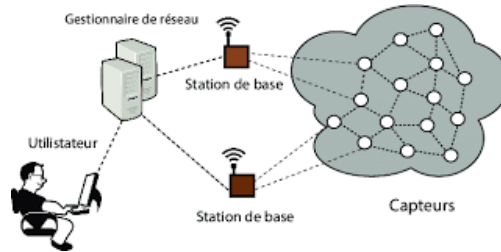


FIGURE 1.3 – Architecture de réseau

La station de base envoie des commandes aux noeuds de capteur et le noeud de capteur exécute la tâche en collaborant les uns avec les autres. Après avoir collecté les données nécessaires, les noeuds de capteur renvoient les données à la station de base.

Une station de base sert également de passerelle vers d'autres réseaux via internet. Après avoir reçu les données des noeuds de capteur, une station de base effectue un traitement de données simple et envoie les informations mises à jour à l'utilisateur en utilisant internet.

Si chaque noeud de capteur est connecté à la station de base, il est connu sous le nom d'architecture de réseau à un seul saut. Bien que la transmission longue distance soit possible, la consommation d'énergie pour la communication sera nettement plus élevée que la collecte et le calcul des données[3].

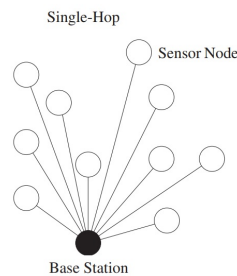


FIGURE 1.4 – réseaux de capteur sans fil d'un seule-saut

Alors l'architecture de réseau multi-sauts est généralement utilisée. Au lieu d'une seule liaison entre le noeud de capteur et la station de base, les données sont transmises via un ou plusieurs noeuds intermédiaires.

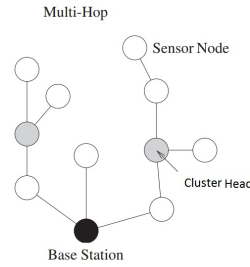


FIGURE 1.5 – réseaux de capteur sans fil multi-sauts

Cela peut être mis en oeuvre de deux manières. Architecture de réseau plat et architecture de réseau hiérarchique. Dans une architecture plate, la station de base envoie des commandes à tous les noeuds de capteur, mais le noeud de capteur avec la requête correspondante répondra en utilisant ses noeuds homologues via un chemin à sauts multiples[3].

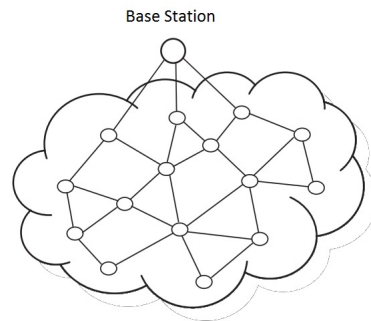


FIGURE 1.6 – WSN

Dans l'architecture hiérarchique, un groupe de noeuds de capteurs est formé en tant que cluster et les noeuds de capteur transmettent des données aux têtes de cluster correspondantes. Les têtes de cluster peuvent alors relayer les données vers la station de base.

### 1.3 Topologies de réseau dans RCSF

Les réseaux de capteur sans fil peuvent être un réseau à saut unique ou un réseau à sauts multiples. Dans ce qui suit, nous allons découvrir certaines la topologie de ce réseau :

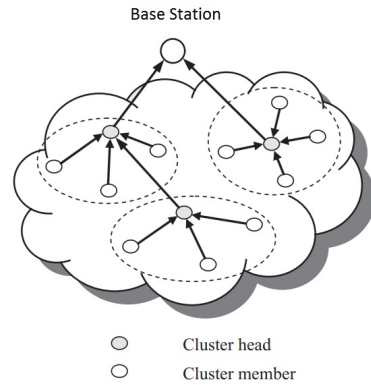


FIGURE 1.7 – WSN

### 1.3.1 Topologie en étoile

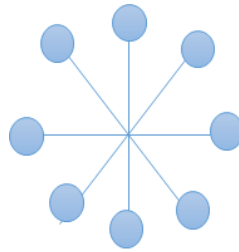


FIGURE 1.8 – Topologie en étoile

Dans la topologie en étoile, il existe un seul noeud central appelé concentrateur ou commutateur et chaque noeud du réseau est connecté à ce concentrateur. La topologie en étoile est très facile à mettre en oeuvre, à concevoir et à étendre. Comme toutes les données circulent à travers le concentrateur, et une panne dans le concentrateur peut entraîner une panne de l'ensemble du réseau[3].

### 1.3.2 Topologie arborescente

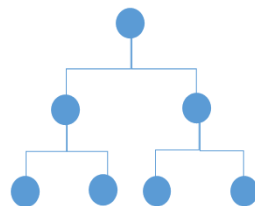


FIGURE 1.9 – Topologie arborescente

Une topologie arborescente est un réseau hiérarchique où il y a un seul nœud racine en haut et ce nœud est connecté à de nombreux nœuds au niveau suivant et cela continue. La puissance de traitement et la consommation d'énergie sont les plus élevées au niveau du nœud racine et continuent de diminuer à mesure que nous descendons dans l'ordre hiérarchique[3].

### 1.3.3 Le réseau en anneau

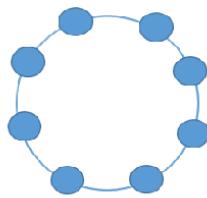


FIGURE 1.10 – Topologie en anneau

Un réseau a une topologie en anneau quand toutes ses stations sont connectées en chaîne les unes aux autres par une liaison bipoint de la dernière à la première. Chaque station joue le rôle de station intermédiaire. Chaque station qui reçoit une trame, l'interprète et la ré-émet à la station suivante de la boucle si c'est nécessaire. La défaillance d'un hôte rompt la structure d'un réseau en anneau si la communication est unidirectionnelle, en pratique un réseau en anneau est souvent composé de 2 anneaux contra-rotatifs[15].

### 1.3.4 Le réseau en bus

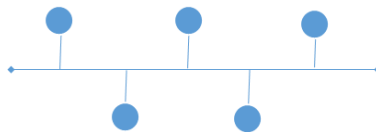


FIGURE 1.11 – Topologie en anneau bus

Cette topologie est représentée par un câblage unique des unités réseaux. Il a également un faible coût de déploiement et la défaillance d'un nœud (ordinateur) ne scinde pas le réseau en deux sous-réseaux. Ces unités sont reliées de façon passive par dérivation électrique ou optique.

Les caractéristiques de cette topologie sont les suivantes :

- Lorsqu'une station est défectueuse et ne transmet plus sur le réseau, elle ne perturbe pas le réseau.
- Lorsque le support est en panne, c'est l'ensemble du réseau qui ne fonctionne plus.
- Le signal émis par une station se propage dans un seul sens ou dans les deux sens.
- Si la transmission est bidirectionnelle : toutes les stations connectées reçoivent les signaux émis sur le bus en même temps (au délai de propagation près).
- Le bus est terminé à ses extrémités par des bouchons pour éliminer les réflexions possibles du signal[15].

### 1.3.5 Topologie maillée

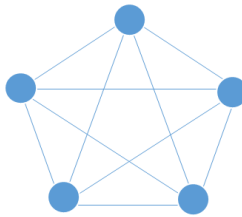


FIGURE 1.12 – Topologie en maillée

Dans la topologie maillée, en plus de transmettre ses propres données, chaque nœud sert également de relais pour transmettre les données des autres nœuds connectés.

Les topologies de maillage sont en outre divisées en maillage entièrement connecté et maillage partiellement connecté.

Dans la topologie maillée entièrement connectée, chaque nœud est connecté à tous les autres nœuds tandis que dans la topologie maillée partiellement connectée, un nœud est connecté à un ou plusieurs nœuds voisins[3].

## 1.4 Caractéristiques et Limites des réseaux de capteurs

### 1.4.1 Caractéristiques

- ✓ **Absence d'infrastructure** : Les réseaux ad hoc, en général, se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.
- ✓ **Taille** : Un grand nombre de nœuds dispersés aléatoirement (des réseaux de 10000 nœuds peuvent être envisagés).
- ✓ **Contrainte d'énergie** : Dans plusieurs applications, les nœuds de capteurs sont placés dans des surfaces distantes, le service du nœud peut ne pas être possible, dans ce cas la durée de vie du nœud peut être déterminée par la durée de vie de la batterie, ce qui exige la minimisation des dépenses d'énergies.
- ✓ **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.
- ✓ **Auto organisation du réseau** : Ceci peut être nécessaire dans plusieurs cas. Par exemple, un réseau comportant un grand nombre de nœuds placés dans des endroits hostiles où la configuration manuelle n'est pas faisable, doit être capable de s'auto-organiser. Un autre cas est celui où un nœud est inséré ou retiré (à cause d'un manque d'énergie ou de destruction physique), ainsi le réseau doit être capable de se reconfigurer pour continuer sa fonction.
- ✓ **Sécurité physique limitée** : Les RCSF mobiles sont plus touchés par les paramètres 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[16].

### 1.4.2 Limites

Les ressources de calcul et de mémoire des nœuds sont relativement faibles, par exemple les nœuds de capteur de type "mote" sont composés d'un microcontrôleur 8- bits 4MHz,

---

40 KOctets de mémoire et une radio avec un débit d'environ 10 kbps. Non seulement les capacités des nœuds sont faibles, mais en plus ils opèrent sur des piles et par conséquent ont une durée de vie limitée. L'énergie limitée des capteurs est probablement la caractéristique la plus pénalisante, le plus grand des défis dans le domaine des réseaux de capteurs reste de concevoir des protocoles, entre autre de sécurité, qui minimisent l'énergie afin de maximiser la durée de vie du réseau. En d'autres mots, l'énergie est sans aucun doute la ressource qui convient pour gérer avec la plus grande attention.

## 1.5 Classification des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont extrêmement spécifiques à l'application et sont déployés en fonction des exigences de l'application. Par conséquent, les caractéristiques d'un WSN seront différentes de celles d'un autre WSN. Quelle que soit l'application, les réseaux de capteurs sans fil en général peuvent être classés dans les catégories suivantes :

- RCSF statique et mobile.
- RCSF déterministe et non déterministe.
- Station de base unique et station de base multiple WSN.
- Station de base statique et station de base mobile WSN.
- RCSF à un et à plusieurs sauts.
- RCSF auto-reconfigurable et non auto-configurable.
- RCSF homogène et hétérogène.

### 1.5.1 RCSF statique et mobile

RCSF statique et mobile dans de nombreuses applications, tous les nœuds de capteurs sont fixes sans mouvement et ce sont des réseaux statiques. Certaines applications, en particulier dans les systèmes biologiques, nécessitent des nœuds de capteurs mobiles. Ceux-ci sont connus sous le nom de réseaux mobiles. Un exemple de réseau mobile est la surveillance des animaux.

### 1.5.2 RCSF déterministe et non déterministe

Dans un RCSF déterministe, la position d'un nœud de capteur est calculée et fixée. Le déploiement pré-planifié de nœuds de capteurs n'est possible que dans un nombre limité d'applications. Dans la plupart des applications, la détermination de la position des nœuds de capteur n'est pas possible en raison de plusieurs facteurs tels qu'un environnement difficile ou des conditions de fonctionnement hostiles. De tels réseaux ne sont pas déterministes et nécessitent un système de contrôle complexe.

### 1.5.3 Station de base unique et station de base multiple RCSF

Dans une seule station de base RCSF, une seule station de base est utilisée qui est située à proximité de la région de nœud de capteur. Tous les nœuds capteurs communiquent avec cette station de base, dans le cas d'une station de base multiple RCSF, plus de station de base est utilisée et un nœud capteur peut transférer des données vers la station de base la plus proche.

### 1.5.4 Station de base statique et station de base mobile RCSF

Semblable aux nœuds de capteurs, même les stations de base peuvent être statiques ou mobiles. Une station de base statique a une position fixe généralement proche de la région de détection. Une station de base mobile se déplace autour de la région de détection de sorte que la charge des nœuds de capteur soit équilibrée.

### 1.5.5 RCSF à un et à plusieurs sauts

Dans un WSN à un seul saut, les nœuds de capteur sont directement connectés à la station de base. Dans le cas d'un WSN à sauts multiples, des nœuds homologues et des têtes de cluster sont utilisés pour relayer les données afin de réduire la consommation d'énergie.

### 1.5.6 RCSF auto-reconfigurable et non auto-configurable

Dans un WSN non auto - configurable, les réseaux de capteurs ne peuvent pas s'organiser en réseau et s'appuient sur une unité de contrôle pour collecter des informations. Dans la plupart des WSN, les nœuds de capteur sont capables d'organiser et de maintenir la connexion et de travailler en collaboration avec d'autres nœuds de capteur pour accomplir la tâche.

### 1.5.7 RCSF homogène et hétérogène

Dans un WSN homogène, tous les nœuds de capteurs ont une consommation d'énergie, une puissance de calcul et des capacités de stockage similaires. Dans le cas d'un WSN hétérogène, certains nœuds de capteur ont des besoins en puissance de calcul et en énergie plus élevés que d'autres et les tâches de traitement et de communication sont divisées en conséquence[3].

## 1.6 Domaines Applications des RCSF



Les nœuds des réseaux de capteurs peuvent comporter différents types de capteurs, tels que les capteurs sismiques, thermiques, visuels, infrarouges, acoustiques et radar, qui sont capables de surveiller une grande variété de phénomènes ambiants :

- Température
- Humidité
- Mouvement des véhicules
- Pression

- différents niveaux de bruits
- Présence ou absence de certains types d'objets
- niveaux de stress mécanique sur des objets attachés, ainsi que les caractéristiques courantes d'un objet, telles la vitesse, la direction ou encore le volume de l'objet donné.

Les noeuds capteurs peuvent être utilisés pour la surveillance continue d'un phénomène, la détection d'événements, l'identification d'évènements ou encore la surveillance d'une position ou emplacement donné.

Le concept de micro-capteurs interconnectés via un support sans fil ouvre la voie vers de nombreux et nouveaux domaines d'applications qui peuvent être catégorisés en des domaines touchant au militaire, à l'environnement, la santé, les milieux ambiants (maisons) ainsi qu'à d'autres applications commerciales[4]. Il est possible d'élargir cette classification avec plus de catégories telles que l'exploration spatiale, le traitement chimique et les secours en cas de catastrophe .

### 1.6.1 Applications militaires



FIGURE 1.13 – Applications militaires

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent faire partie intégrante des systèmes militaires de commandement, de contrôle, de communication, d'informatique, de renseignement, de surveillance, de reconnaissance et de ciblage .

Le fait que les RCSF reposent sur le déploiement dense d'un grand nombre de noeuds capteurs

jetables et à faible coût, la destruction de certains noeuds n'affectera pas la conduite de l'opération militaire, ce qui favorise l'utilisation des RCSF sur le champ de bataille. Vous trouverez ci-dessous des exemples concrets d'applications militaires utilisant des réseaux de capteurs sans fil[4] :

- Surveillance et contrôle des troupes, du matériel et des munitions.
- Reconnaissance et observation du champ de bataille.
- Détection d'attaques nucléaires, biologiques et chimiques .
- Détection d'incendies de forêts .
- Permettent de minimiser le risque de danger posé par ce type d'attaque.

## 1.6.2 Applications dans l'environnement

Parmi les applications des RCSFs dans l'environnement, on trouve :

- Pister le mouvement d'oiseaux, de petits animaux et d'insectes ;
- Surveillance et contrôle des aspects environnementaux qui peuvent affecter les récoltes et le bétail.
- Détection chimique et biologique.
- Détection d'incendies de forêts.
- Travaux de recherche météorologiques et géophysiques.
- Détection d'inondations.
- Etudes de pollution et schématisation de la bio-complexité de l'environnement...

### 1.6.2.1 Détection d'incendies de forêts



FIGURE 1.14 – Détection d'incendies de forêts

Les nœuds capteurs peuvent être déployés d'une façon aléatoire et dense dans n'importe

quel type de forêt, pouvant ainsi facilement détecter et rapporter l'origine de l'incendie à l'utilisateur avant qu'il ne se propage et devienne incontrôlable. Des millions de nœuds capteurs utilisant les fréquences radio ou la communication par voix optique peuvent être déployés, ces nœuds doivent cependant pouvoir fonctionner d'une manière autonome pendant une longue durée qui peut aller jusqu'à des années, pour cela ils doivent être équipés par des systèmes de rechargement d'énergie efficaces (panneaux solaires par exemple).

### 1.6.3 Agriculture

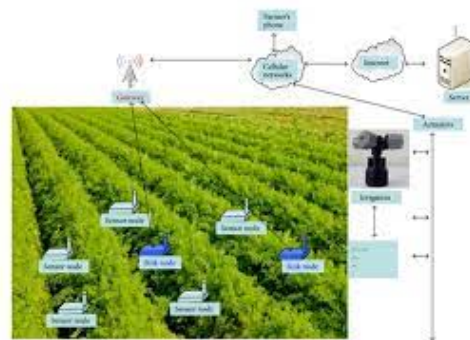


FIGURE 1.15 – Application Agriculture

Les réseaux de capteurs sont capables d'apporter des bénéfices considérables au domaine de l'agriculture, grâce à leur habilité à surveiller les taux de pesticides dans l'eau potable, le degré d'érosion du sol, le degré d'humidité et le niveau de pollution de l'air en temps réel.

### 1.6.4 Applications dans le domaine médical

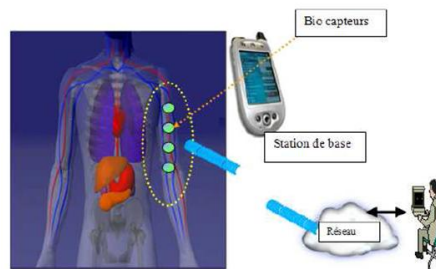


FIGURE 1.16 – Application rcsf dans le domaine médical

Les réseaux de capteurs peuvent être très utiles dans le domaine médical[4] :

- Fournir des interfaces d'aides aux handicapés
- Capteurs intégrés pour la surveillance de patients
- Diagnostique
- Administration des médicaments au sein de l'hôpital
- Surveillance des mouvements et processus internes d'insectes ou d'autres petits animaux.

### Télésurveillance et contrôle de données physiologiques humaines

Les informations physiologiques collectées par un RCSF peuvent être stockées pendant une longue période, et utilisées par la suite pour des fins multiples, notamment les explorations médicales.

Les réseaux de capteurs installés peuvent également détecter et surveiller le comportement des personnes âgées et permettre une intervention rapide en cas de nécessité, ce qui donne aux sujets surveillés une meilleure liberté de mouvements et permet aux médecins traitants d'identifier plus rapidement certains symptômes prédéfinis. Ceci assure aux patients une meilleure qualité de vie comparée à celle qu'on trouve actuellement dans les centres hospitaliers.

#### 1.6.5 Applications dans les maisons

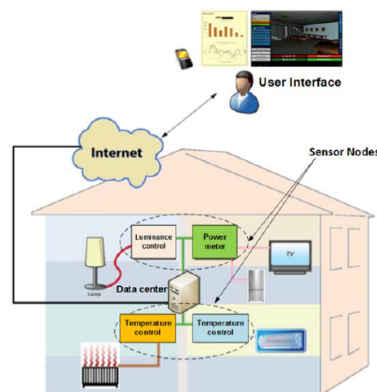


FIGURE 1.17 – Application rcsf dans dans les maisons

Les applications de contrôle domestique fournissent le contrôle, la conservation, la commodité et la sécurité, comme suit (voir Figure 1.17) :

- Les applications de détection facilitent la gestion flexible des systèmes d'éclairage, de chauffage et de refroidissement de n'importe où dans la maison.
- Les applications de détection automatisent le contrôle de plusieurs systèmes domestiques pour améliorer la conservation, la commodité et la sécurité.
- Les applications de détection capturent des données très détaillées sur l'utilisation des services publics d'électricité, d'eau et de gaz.
- Les applications de détection intègrent l'intelligence pour optimiser la consommation des ressources naturelles.
- Les applications de détection permettent l'installation, la mise à niveau et la mise en réseau d'un système de contrôle domestique sans fil.
- Les applications de détection permettent de configurer et d'exécuter plusieurs systèmes à partir d'une seule télécommande.
- Les applications de détection prennent en charge l'installation simple de capteurs sans fil pour surveiller une grande variété de conditions.
- Les applications de détection facilitent la réception d'une notification automatique lors de la détection d'événements inhabituels.

#### 1.6.5.1 Automatisation des maisons

Grâce aux avancées technologiques, des nœuds capteurs intelligents peuvent être intégrés dans les appareils électroménagers tel que les aspirateurs, fours micro-ondes, réfrigérateurs, et magnétoscopes. Ces nœuds capteurs peuvent interagir entre eux ainsi qu'avec les réseaux externes via Internet ou à travers les satellites pour permettre à l'utilisateur de contrôler plus aisément ces appareils d'une façon locale ou distante[4].

### 1.6.6 Autres applications commerciales

Les réseaux de capteurs possèdent également d'autres applications dans le domaine commercial telles que :

- Surveillance de l'état du matériel.
- Gestion des inventaires.
- Contrôle de qualité des produits.
- Construction des espaces d'achat intelligents.
- Contrôle des robots dans les environnements de fabrications automatiques.
- Les musées interactifs.
- Diagnostique des machines.
- Détection et la surveillance des vols de voitures, etc.

#### Détection et surveillance des vols de voitures

Les nœuds capteurs peuvent être déployés pour identifier et détecter les menaces de vols dans une région géographique, et rapporter ces menaces à un utilisateur distant à travers Internet pour les analyser.

#### Gestion et contrôle de l'inventaire

Chaque article dans le magasin pourrait avoir un nœud capteur qui lui est attaché, dès lors, les utilisateurs pourront facilement localiser l'article et calculer la quantité exacte de chaque catégorie d'articles. Si des utilisateurs veulent insérer de nouveaux inventaires, ils n'auront qu'à attacher les capteurs appropriés à ces inventaires. Il est clair que les réseaux de capteurs possèdent un potentiel d'exploitation et d'application gigantesque dans le monde réel, ce qui explique l'engouement de la communauté scientifique ainsi que l'importante activité de recherche autour de ce type de réseaux. Ces travaux de recherche ayant pour objectif l'élévation des RCSFs au rang de technologie mature et indispensable dans la majorité des domaines[4].

## 1.7 Protocoles de routage dans les RCSFs

Un protocole réseau est un ensemble de règles et de procédures de communication qui sont exécutées sur un réseau informatique ou un réseau de communication .

Il existe de nombreux protocoles réseaux, mais ils n'ont pas tous, ni le même rôle[5] Beaucoup configurent également des couches de protocole.

### 1.7.1 Pile protocole

Dans le but d'améliorer la robustesse du réseau de capteurs sans fil et assurer certaines fonctionnalités, une architecture en couches est adoptée. La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que par tous les autres noeuds capteurs du réseau . Ce modèle comprend 5 couches (une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique) ainsi que 3 niveaux (plans) qui sont : un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches[11].

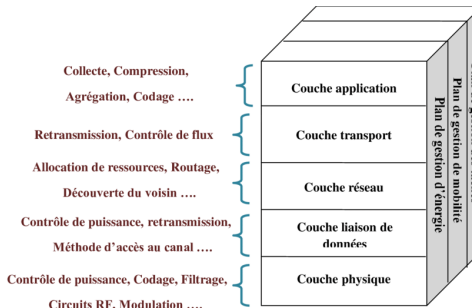


FIGURE 1.18 – pile protocole dans les RCSF

#### La couche physique

La couche physique est responsable de la bonne émission et réception de données, de la sélection des fréquences et de la détection du signal.

#### La couche liaison de données

Cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et du verrouillage des trames de données et du contrôle des erreurs. Elle assure une connexion

fiable (point à point ou point-à-multipoints) selon la topologie du réseau de capteurs.

### **La couche réseau**

La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données (trouver une route et une transmission fiable des données) captées, des noeuds capteurs vers la station de base en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs.

### **La couche transport**

Cette couche est chargée du transport des données sans réordonnement ou duplication, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

### **La couche application**

C'est le niveau le plus proche de l'utilisateur, elle assure l'interface avec les applications. Selon les tâches de détection, différents types d'applications peuvent être implémentés et utilisés sur la couche application.

Quant aux niveaux (plans) intégrés dans la pile protocolaire dans les RCSFs, ils assurent les fonctions suivantes :

#### **1. Le plan de gestion d'énergie**

La vie du noeud montre une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie. Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception radio dès qu'il reçoit un message d'un noeud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués.

#### **2. Le plan de gestion de mobilité**

Selon le type d'application, les noeuds capteurs peuvent être mobiles. Ce plan est responsable d'enregistrer les mouvements d'un noeud et de connaître sa localisation.

### 3. Plan de gestion de tâches

Le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents noeuds du réseau, afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau.

## 1.8 Le routage dans les RCSF

La conception de protocoles de routage pour les RCSF fait face à de nombreux défis dus aux particularités de ces réseaux et à la non fiabilité des liaisons sans fil. Dans ce qui suit, nous allons énumérer les principaux défis auxquels est confronté le routage dans les RCSF.

### 1.8.1 Consommation d'énergie

En raison du budget énergétique limité alloué aux noeuds capteurs, la consommation d'énergie est la principale préoccupation dans les RCSF. Par conséquent tous les protocoles de la pile protocolaire doivent obligatoirement tenir compte de la rareté de cette ressource. Ainsi, un protocole de routage doit acheminer les données, depuis les noeuds sources vers le(s) noeud(s) puits, à faible coût énergétique sans pour autant compromettre la précision du contenu de l'information (c-à-d d'une façon fiable). Pour y'arriver, un tel protocole ne doit pas se contenter uniquement de la métrique conventionnelle qui consiste à minimiser le nombre de sauts entre la source et la destination. Cette métrique peut en effet ne pas convenir à cause de la non fiabilité des liaisons sans fil. De nouvelles métriques de routage à efficacité énergétique doivent être développées pour les RCSFs. Elles peuvent être développées en se basant sur une approche inter-couches.

### 1.8.2 Passage à l'échelle

Les RCSFs sont généralement constitués d'un grand nombre de noeuds, de l'ordre de centaines ou de milliers ou plus, déployés le plus souvent avec une haute densité pour pouvoir observer en détail les phénomènes physiques. Le grand nombre de noeuds empêche les noeuds de connaître la topologie de l'ensemble du RCSF. Par conséquent, des protocoles

entièrement distribués, fonctionnant avec une connaissance limitée de la topologie, doivent être développés pour permettre le passage à l'échelle. De plus, étant donné que la densité est élevée dans le réseau, l'échange d'informations locales devrait également être limité pour améliorer la performance du réseau en termes d'énergie. En outre, étant que les utilisateurs dans un RCSF sont intéressés par des informations collectives provenant de plusieurs capteurs concernant un phénomène physique donné au lieu d'informations provenant de capteurs individuels, le protocole de routage doit prendre en charge le traitement en réseau sans compromettre la consommation d'énergie.

### 1.8.3 Robustesse

La tolérance aux pannes est l'un des problèmes critiques dans les RCSFs. En effet, les noeuds capteurs sont susceptibles d'être défaillants en raison de :

- L'épuisement de l'énergie.
- Une défaillance matérielle.
- Erreurs de liaison de communication ( à cause de l'irrégularité de la radio ou de l'interférence).
- Une attaque malveillante.
- Un protocole de routage pour les RCSFs doit donc être robuste contre ces défaillances.

### 1.8.4 Topologie

Dans plusieurs études, la topologie des RCSFs est supposée être statique. Cependant, dans de nombreuses applications, les noeuds puits, les noeuds capteurs ou l'évènement observé (la cible) peuvent être mobiles. En outre, en raison de la rareté de la ressource énergétique, les noeuds peuvent basculer entre deux états, actif et sommeil, pour économiser de l'énergie. Quand un noeud est dans un état de sommeil, il est retiré de la topologie du réseau. Il la rejoindra à nouveau quand il basculera en mode actif. Ces changements dynamiques peuvent affecter la structure de communication et par conséquent, les routes. Le protocole de routage doit donc s'adapter à ces changements de topologie du réseau.

### 1.8.5 Application

Le type d'application joue un rôle important dans la conception des protocoles de routage. En effet, dans les applications de surveillance de l'environnement, les noeuds communiquent périodiquement leurs données collectées. des routes statiques peuvent être utilisées pour acheminer ces données, et ce tout au long de la durée de vie du RCSF. Cependant, dans les applications basées sur des événements, les noeuds capteurs sont en état de veille la plupart du temps. Dès qu'un événement se produit, des routes doivent être générées, depuis le noeud qui a détecté l'évènement jusqu'au noeud puits, pour transmettre l'alerte à temps. Dans le cas de schémas basés sur des requêtes, C'est au noeud sink de demander des données aux capteurs en cas de besoin. Il s'agit en effet du routage orienté-données qui fournit des itinéraires en fonction du contenu de la requête.

### 1.8.6 Adressage

En raison du nombre relativement important de noeuds capteurs dans un réseau, les protocoles de routage basés sur les adresses ne peuvent pas être adoptés dans les RCSFs car ils nécessitent des adresses uniques pour chaque noeud du réseau. En outre, les utilisateurs sont intéressés par des informations collectives provenant de plusieurs capteurs concernant un phénomène physique donné au lieu d'informations provenant de capteurs individuels. Par conséquent, des protocoles de routage basés sur de nouveaux mécanismes d'adressage ou de nouvelles techniques de routage qui ne nécessitent pas d'identifiants uniques pour chaque noeud sont nécessaires routage centré sur les données.

## 1.9 Métriques de routage

Dans ce qui suit, nous allons présenter un bref aperçu sur les métriques de routage couramment utilisées dans les RCSFs .

### 1.9.1 Nombre de sauts minimal

C'est la métrique la plus utilisée dans les protocoles de routage. Elle consiste à trouver le chemin, du nœud source vers le nœud destination, nécessitant le plus petit nombre de sauts. L'utilisation de cette métrique devrait normalement générer de faibles délais de bout en bout et une faible consommation de ressources, puisqu'elle réduit le nombre de nœuds impliqués dans la communication. Cependant, étant donné que l'approche basée sur le nombre de sauts minimal ne tient pas compte de la disponibilité réelle des ressources au niveau de chaque nœud, la route générée est probablement non optimale en termes de délai, d'énergie et d'évitement de congestion. .

### 1.9.2 Energie

Etant donné que la consommation de l'énergie est une préoccupation majeure dans les RCSF, l'efficacité énergétique est un aspect fondamental du routage dans ces réseaux. Cependant, il convient de noter qu'à la place d'une métrique d'énergie unique pouvant être appliquée au Métriques de routage problème de routage, il existe différentes interprétations de l'efficacité énergétique, dont nous énumérons quelques unes d'entre elles ci-dessous .

#### 1.9.2.1 Energie minimale consommée par paquet

L'objectif est de minimiser la quantité totale d'énergie dépensée pour l'acheminement d'un seul paquet de la source à la destination. L'énergie totale est la somme de l'énergie consommée par chaque nœud constituant le chemin entre la source et la destination, pour recevoir et transmettre le paquet.

#### 1.9.2.2 Temps maximum pour la partition d'un réseau

La partition d'un réseau peut intervenir suite à l'épuisement de la batterie d'un nœud qui relie deux parties de ce réseau, créant ainsi un sous-réseau qui n'est pas joignable. Pour éviter un tel scénario, il devient essentiel de réduire la consommation d'énergie de l'ensemble minimal de nœuds dont la suppression entraînera la partition du réseau. Par conséquent, on maintient un réseau où chaque nœud capteur peut être atteint via au moins une route.

### 1.9.2.3 Variance minimale des niveaux de puissance des nœuds

Il s'agit de répartir la consommation d'énergie sur tous les nœud du réseau qui sont considérés tous comme ayant une importance égale. Le but d'une telle approche pourrait être de maximiser la durée de vie du réseau.

### 1.9.2.4 Maximum (moyenne) de la capacité énergétique totale

Contrairement à la métrique "énergie minimale consommée par paquet" qui s'intéresse au coût énergétique de l'acheminement d'un paquet de la source à la destination, cette approche met l'accent sur l'énergie résiduelle (capacité énergétique) au niveau des nœuds capteurs. Un protocole de routage basé sur cette métrique privilégie les routes constituées de nœuds capteurs qui disposent de la plus grande énergie résiduelle, de la source à la destination. Ces routes sont dites routes à capacité énergétique totale maximale. Cependant, un tel protocole doit éviter de choisir des chemins inutilement longs afin de maximiser la capacité énergétique totale. Une variante de cette métrique est de maximiser la capacité énergétique moyenne ce qui permet d'éviter ce problème.

### 1.9.2.5 Maximum de la capacité énergétique minimale

L'objectif est de sélectionner la route ayant la plus grande capacité énergétique minimale. Cette technique favorise également les routes avec des réserves d'énergie plus importantes, mais protège également les nœuds de faible capacité contre l'expiration prématurée.

## conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté la structure interne des micro-capteurs, ainsi que les réseaux de capteurs et leurs domaines d'application.

Les réseaux de capteurs sans fil ont des caractéristiques particulières qui les distinguent des autres types de réseaux sans fil. Des spécifications telles que la faible consommation d'énergie, l'évolutivité ou le routage augmentent le besoin de Concevoir de nouveaux protocoles d'accès aux médias, de routage, de sécurité, de transport ou d'application qui s'adapteront aux caractéristiques des RCSF . Initialement destiné à des applications militaires, le RCSF a

aujourd'hui réussi à conquérir d'autres domaines civils plus vastes et plus pratiques qui changent le quotidien des êtres humains.

---

---

## CHAPITRE 2

---

# MODÉLISATION DU PROBLÈME DE MAXIMISATION DE LA DURÉE DE VIE D'UN RCSF

### Introduction

Récemment, l'intérêt s'est accru pour le développement et la conception de réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Cependant, la conception et la mise en oeuvre de réseaux sans fil sont confrontées à de nombreux défis, en raison de la puissance limitée des nœuds de capteurs, du déploiement et de la localisation, du routage et de l'agrégation des données, de la sécurité des données, de la capacité de stockage et de la gestion du réseau.

Les RCSF sont de plus en plus utilisés et avec eux divers problèmes de collecte d'énergie, de routage et de positionnement des capteurs. En effet, du fait de la capacité de puissance limitée des capteurs, le développement des réseaux sans fil se heurte à plusieurs limitations : comment augmenter la durée de vie du réseau avec une capacité aussi limitée : Comment les informations/données sont-elles continuellement dirigées efficacement.

Les nœuds qui composent les réseaux de capteurs sans fil transmettent des données à d'autres

noeuds ou stations de base. Chaque noeud a une tâche spécifique et une petite capacité de stockage d'énergie en fonction de sa miniaturisation. Les différents noeuds sont situés dans différentes régions pour assurer une couverture/détection maximale. Les noeuds ont la capacité de collecter et d'acheminer/transmettre des données et de prendre une « petite » décision. La ou les stations de base sont des noeuds spéciaux qui peuvent être fixes ou mobiles. Les RCSF se connectent à un domaine de réseau spécifique via un intranet. Plusieurs études récentes ont suggéré des approches de conservation d'énergie et de consommation d'énergie dans les RCSF ainsi que des protocoles de routage pour prendre en compte les limitations des RCSF. Il est connu que la recherche opérationnelle (RO) a été largement utilisée dans divers domaines pour résoudre des problèmes d'optimisation, tels que l'amélioration des performances du réseau et la maximisation de la durée de vie du système [18], ce que nous cherchons à atteindre dans ce travail.

## 2.1 Routage pour la durée de vie maximale du système

Chaque noeud a une capacité énergétique qui doit être utilisée efficacement pour maximiser la durée de vie du réseau, car une défaillance du capteur peut déconnecter complètement le réseau, une fois le noeud épuisé son énergie. Chaque noeud est capable de recevoir et d'envoyer des paquets à un noeud spécifique qui collectera les informations. Ces paquets sont envoyés sous forme de messages.

Ainsi le capteur peut être dans deux états à un instant donné : en émission ou en réception. Le principal problème des RCSF est l'épuisement progressif de l'alimentation pendant le processus de transfert des données d'un noeud à un autre jusqu'au noeud gestionnaire (la station de base).

Notre travail est basé sur celui de **Chang et Tassiulas (2004)** [17] qui ont modélisé le problème de routage comme un problème de programmation linéaire dont l'objectif était de maximiser la durée de vie du réseau qui est égale au temps écoulé jusqu'à la coupure du réseau. **Chang et Tassiulas** s'est concentré sur l'économie d'énergie lors de l'envoi et de la réception de tous les produits, et la question du routage avec une durée de vie maximale

a été étendue pour inclure la consommation d'énergie des émetteurs lors de l'envoi et de la réception et des émetteurs pendant la transmission. Contrairement à [17] qui considérait que la puissance d'émission ou de réception est la même d'énergie pour tous les type d'information, nous avons utilisé des énergies d'émission et de transmission différentes selon les types d'information.

## 2.2 Description du problème et modélisation

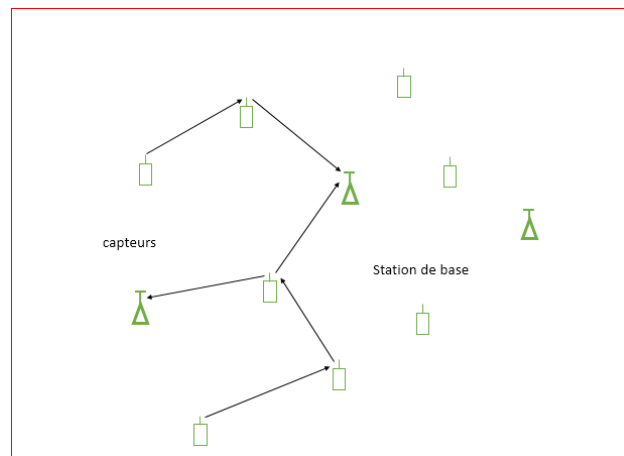


FIGURE 2.1 – Exemple de RCSF

Chaque noeud a une capacité énergétique qui doit être utilisée efficacement pour maximiser la durée de vie du réseau, car une défaillance du capteur peut déconnecter complètement le réseau, Une fois le noeud épuise son énergie. Chaque noeud est capable de recevoir et d'envoyer des paquets à un noeud spécifique choisi par l'administrateur qui collectera les informations, ces paquets sont envoyés sous forme de messages.

Ainsi le capteur peut être dans deux états à un instant donné : en émission ou en réception.

Un réseau de capteurs sans fil est modélisé sous la forme d'un graphe orienté  $G = (N, V)$  où :

- $N$  : est l'ensemble de tous les noeuds.

- $V$  : est l'ensemble de tous les liens directs  $(i; j)$ .

il y'a différents types d'informations qui sont produits par les noeuds (capteurs) et on désigne par  $C$  l'ensemble qui énumère les différents types d'informations produites (par exemple,

température, pression, etc.) pour chaque produit  $\mathbf{c} \in \mathbf{C}$ , on désigne aussi par  $O(c)$  l'ensemble des noeuds qui génèrent l'information de type  $(c \in C)$  où un noeud  $i$  qui appartient à  $O(c)$  génère l'information avec un taux  $Q_i^{(c)}$ .

$O^{(c)}$  est alors défini par :

$$\mathbf{O}^{(c)} = \{\mathbf{m} | \mathbf{Q}_m^{(c)} > \mathbf{0}, \mathbf{m} \in \mathbf{N}\}$$

$-\mathbf{D}^{(c)}$  : est l'ensemble de noeuds de destination qui peuvent recevoir l'information de type  $c$ .

$-\mathbf{S}_i$  : est l'ensemble des noeuds qui peuvent être atteints par le noeud  $i$  avec un certain niveau de puissance dans sa plage dynamique.

Un lien  $(i; j)$  existe si et seulement si  $j \in S_i$ .

$-\mathbf{Q}_i^{(c)}$  : représente le taux de génération de l'information de type  $\mathbf{c}$  au noeud  $\mathbf{i}$ .

$-\mathbf{q}_{ij}^{(c)}$  : représente la quantité de données  $(c)$  à faire transiter de  $i$  vers  $j$ .

$-\mathbf{E}_i$  : est l'énergie initiale de la batterie du noeud  $i$ .

$-\mathbf{e}_{ij}^{\text{tc}}$  : est l'énergie nécessaire pour le noeud  $i$  pour **transmettre** une unité de donnée de type  $c$  vers le noeud  $j$ .

$-\mathbf{e}_{ji}^{\text{rc}}$  : est l'énergie nécessaire pour le noeud  $i$  pour **recevoir** une unité de donnée de type  $c$  envoyée par le noeud  $j$ .

Pour transmettre  $q_{ij}^{(c)}$  unités, on a besoin de :

$$\mathbf{e}_{ij}^{\text{tc}} \mathbf{q}_{ij}^{(c)}, \forall \mathbf{i} \in \mathbf{N}, \forall \mathbf{j} \in \mathbf{S}_i, \forall \mathbf{c} \in \mathbf{C}$$

$$\mathbf{e}_{ij}^{\text{tc}} \mathbf{q}_{ij}^{(c)}, \forall \mathbf{i} \in \mathbf{N}, \forall \mathbf{j} \in \mathbf{S}_i, \forall \mathbf{c} \in \mathbf{C}$$

et pour recevoir  $q_{ji}^{(c)}$  unités, on a besoin de :

$$\mathbf{e}_{ji}^{\text{rc}} \mathbf{q}_{ji}^{(c)}, \forall \mathbf{i} \in \mathbf{N}, \forall \mathbf{j} : \mathbf{i} \in \mathbf{S}_j, \forall \mathbf{c} \in \mathbf{C}$$

L'énergie nécessaire pour transmettre toutes les informations de  $i$  vers  $j$  égale à :

$$\sum_{\mathbf{c} \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{ij}^{\text{tc}} \mathbf{q}_{ij}^{(c)}, \forall \mathbf{i} \in \mathbf{N}, \forall \mathbf{j} \in \mathbf{N}$$

L'énergie nécessaire pour recevoir toutes les informations de  $j$  vers  $i$  égale à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ji}^{rc} \mathbf{q}_{ji}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{N}, \forall j \in \mathbf{N}$$

La somme de toutes les énergie consommées par  $i$  dans transmission des données collectées dans différents noeuds est :

$$\sum_{j \in \mathbf{S}_i} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ij}^{tc} \mathbf{q}_{ij}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{N}$$

La somme de toutes les énergie consommées par  $j$  dans la réception des données collectées dans différents noeuds est :

$$\sum_{j:i \in \mathbf{S}_j} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ji}^{rc} \mathbf{q}_{ji}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{N}$$

alors le temps qu'il faut pour que la batterie du noeud  $i$  se vide sous le débit  $\mathbf{q} = \{\mathbf{q}_{ij}\}$  est donnée par [17] :

$$\mathbf{T}_i(\mathbf{q}) = \frac{\mathbf{E}_i}{\sum_{j \in \mathbf{S}_i} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ij}^{tc} \mathbf{q}_{ij}^{(c)} + \sum_{j:i \in \mathbf{S}_j} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ji}^{rc} \mathbf{q}_{ji}^{(c)}}$$

**Durée de vie du système :** La durée de vie du système sous flux  $q$  est définie comme la durée de vie minimale de la batterie sur tous les noeuds

$$\mathbf{T}_{\text{sys}}(\mathbf{q}) = \min_{i \in \mathbf{N}} \mathbf{T}_i(\mathbf{q})$$

en utilisant la définition de la durée de vie du système, nous pouvons exprimer le problème comme suit :

$$\max_{\mathbf{q}} \mathbf{T}_{\text{sys}}(\mathbf{q}) \Leftrightarrow \max_{\mathbf{q}} \min_{i \in \mathbf{N}} \frac{\mathbf{E}_i}{\sum_{j \in \mathbf{S}_i} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ij}^{tc} \mathbf{q}_{ij}^{(c)} + \sum_{j:i \in \mathbf{S}_j} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ji}^{rc} \mathbf{q}_{ji}^{(c)}}$$

On peut observer que le problème de maximiser la durée de vie du système :

$$\text{MaxT}_{\text{sys}}(\mathbf{q}) \quad (2.1)$$

$$\text{s.t} \quad \mathbf{q}_{ij}^{(c)} \geq \mathbf{0}, \forall i \in \mathbf{N}, \forall j \in \mathbf{S}_i, \forall c \in \mathbf{C}$$

$$\sum_{j:i \in \mathbf{S}_j} \mathbf{q}_{ji}^{(c)} + \mathbf{Q}_i^{(c)} = \sum_{j \in \mathbf{S}_i} \mathbf{q}_{ij}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{N} - \mathbf{D}^{(c)}, \forall c \in \mathbf{C} \quad (2.2)$$

En introduisant les variables  $T$  et  $\hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)} = T\mathbf{q}_{ij}^{(c)}$ , on peut modéliser le problème comme le programme linéaire suivant :

$$\text{MaxT}$$

$$\text{s.t} \quad \hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)} \geq \mathbf{0}, \forall i \in \mathbf{N}, \forall j \in \mathbf{S}_i, \forall c \in \mathbf{C}.$$

$$\sum_{j \in \mathbf{S}_i} \sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{ij}^{tc} \hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)} + \sum_{j:i \in \mathbf{S}_j} \sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{ji}^{rc} \hat{\mathbf{q}}_{ji}^{(c)} \leq \mathbf{E}_i, \forall i \in \mathbf{N}.$$

$$\sum_{j:i \in \mathbf{S}_j} \hat{\mathbf{q}}_{ji}^{(c)} + T\mathbf{Q}_i^{(c)} = \sum_{j \in \mathbf{S}_i} \hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{N} - \mathbf{D}^{(c)}, \forall c \in \mathbf{C}$$

$\hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)}$  c'est la quantité de donnée transmise de  $i$  vers  $j$ , jusqu'à l'instant  $T$ .

## 2.3 L'application

: Dans ce qui suit, on présente deux exemples pour illustrer le fonctionnement d'un réseau de capteurs auxquels on donne les 02 programme linéaires associés.

### Exemple 01

Considérons un réseau de capteurs sans fil avec 02 noeuds  $N = \{i, j\}$

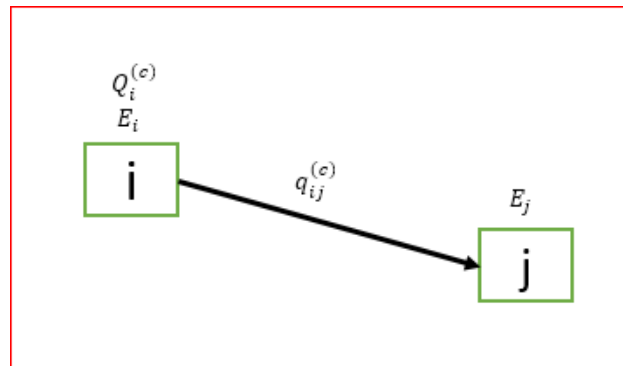


FIGURE 2.2 – Exemple de RCSFs de 02 noeuds

On a un seul type de données à transmettre du noeud  $i$  vers le noeud  $j$ , donc  $\mathbf{C} = \{\mathbf{c}\}$

$$\mathbf{O}^{(c)} = \{\mathbf{i} | \mathbf{Q}_i^{(c)} > \mathbf{0}, \mathbf{i} \in \mathbf{N}\} = \{i\}$$

$$-\mathbf{S}_i = \{j\}$$

$$-\mathbf{S}_j = \{\}$$

$$-\mathbf{D}^c = \{j\}$$

$-\mathbf{E}_i$  :est l'énergie initiale de la batterie du noeud  $i$ .

$-\mathbf{E}_j$  :est l'énergie initiale de la batterie du noeud  $j$ .

donc on a :

La quantité de données qui va transiter d'un noeud  $i$  vers noeud  $j$  est égal à :

$$\sum_{\mathbf{c} \in \mathbf{C}} \mathbf{q}_{ij}(\mathbf{c}) = \mathbf{q}_{ij}(\mathbf{c})$$

La quantité de données qui va transiter d'un noeud  $j$  vers noeud  $i$  est égal à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{q}_{ji}^{(c)} = \mathbf{0}.$$

L'énergie nécessaire pour transmettre toutes les données de  $i$  vers  $j$  égale à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{ij}^{tc} \mathbf{q}_{ij}^{(c)} = \mathbf{e}_{ij}^{tc} \mathbf{q}_{ij}(\mathbf{c})$$

L'énergie nécessaire pour recevoir toutes les données de  $j$  vers  $i$  égale à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{ji}^{rc} \mathbf{q}_{ji}^{(c)} = \mathbf{e}_{ji}^{rc} \mathbf{q}_{ji}(\mathbf{c})$$

La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission vers tous les noeuds accessibles depuis  $i$  (c-à-d. les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_i$ ) est :

$$\sum_{k \in \mathbf{S}_i} \sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{ik}^{tc} \mathbf{q}_{ik}^{(c)} = \mathbf{e}_{ij}^{tc} \mathbf{q}_{ij}^{(c)}$$

La somme de toutes les énergie consommées par  $i$  dans la reception de toutes les données est :

$$\sum_{k: i \in \mathbf{S}_k} \sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{ki}^{rc} \mathbf{q}_{ki}^{(c)} = \mathbf{0}$$

on peut calculer le temps qu'il faut pour que la batterie du noeud  $i$  se vide sous le débit  $\mathbf{q} = \{\mathbf{q}_{ij}\}$ , elle est donnée par :

$$\mathbf{T}_i(\mathbf{q}) = \frac{\mathbf{E}_i}{\mathbf{e}_{ij}^{tc} \mathbf{q}_{ij}^{(c)}}$$

et le temps qu'il faut pour que la batterie du noeud  $j$  se vide sous le débit  $\mathbf{q} = \{\mathbf{q}_{ij}\}$  est donné par :

$$\mathbf{T}_j(\mathbf{q}) = \frac{\mathbf{E}_j}{\mathbf{e}_{ij}^{rc} \mathbf{q}_{ij}^{(c)}}$$

Durée de vie du système : La durée de vie du système sous flux  $q$  est définie comme la durée de vie minimale de la batterie sur tous les noeuds

$$\mathbf{T}_{\text{sys}}(\mathbf{q}) = \min_{i \in \mathbf{N}} \{\mathbf{T}_i(\mathbf{q}), \mathbf{T}_j(\mathbf{q})\}$$

d'où :

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } \mathbf{T} \\
 \text{s.t. } & \hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)} \geq \mathbf{0}, \hat{\mathbf{q}}_{ji}^{(c)} \geq \mathbf{0}. \\
 & \mathbf{e}_{ij}^{tc} \hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)} \leq \mathbf{E}_i \\
 & \mathbf{e}_{ij}^c \hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)} \leq \mathbf{E}_j. \\
 & \mathbf{TQ}_i^{(c)} = \hat{\mathbf{q}}_{ij}^{(c)}
 \end{aligned}$$

## Exemple 02

Considérons un réseau de capteurs sans fil avec 04 noeuds  $N = \{s, l, k, h\}$  :

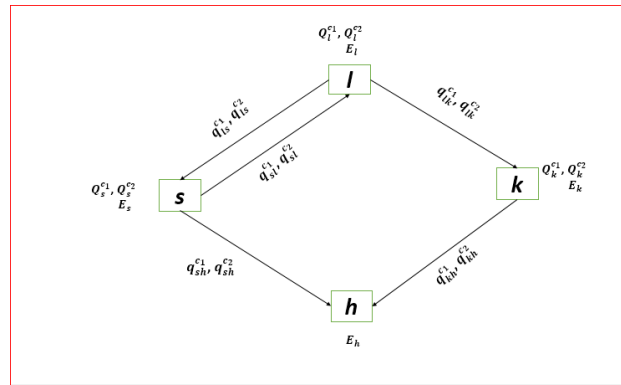


FIGURE 2.3 – Exemple de RCSFs de 04 noeuds

On a 2 type de données à transmettre ,donc  $\mathbf{C} = \{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2\}$  :

$$\mathbf{O}^{(c_1)} = \mathbf{O}^{(c_2)} = \{\mathbf{m} | \mathbf{Q}_m^{(c_1)} > \mathbf{0}, \mathbf{m} \in \mathbf{N}\} = \{s, l, k\}$$

ON a :

$-\mathbf{S}_s = \{l, h\}$  : être l'ensemble des noeuds qui peuvent être atteints par le noeud  $s$  avec un certain niveau de puissance dans sa plage dynamique.

$-\mathbf{S}_l = \{s, k\}$  : être l'ensemble des noeuds qui peuvent être atteints par le noeud  $l$  avec un

certain niveau de puissance dans sa plage dynamique

$-\mathbf{S}_k = \{\mathbf{h}\}$  : être l'ensemble des noeuds qui peuvent être atteints par le noeud  $k$  avec un certain niveau de puissance dans sa plage dynamique

$-\mathbf{S}_h = \{\}$  : être l'ensemble des noeuds qui peuvent être atteints par le noeud  $h$  avec un certain niveau de puissance dans sa plage dynamique

$-\mathbf{D}^{(c_1)} = \mathbf{D}^{(c_2)} = \{\mathbf{h}\}$  :

$-\mathbf{E}_s$  : est l'énergie initiale de la batterie du noeud  $s$ .

$-\mathbf{E}_l$  : est l'énergie initiale de la batterie du noeud  $l$ .

$-\mathbf{E}_k$  : est l'énergie initiale de la batterie du noeud  $k$ .

$-\mathbf{E}_h$  : est l'énergie initiale de la batterie du noeud  $h$ .

$-\mathbf{Q}_s^{(c_1)}$  : le nombre de produit de type  $(c_1)$  que transporte le noeud  $s$  par unité de temps.

$-\mathbf{Q}_s^{(c_2)}$  : le nombre de produit de type  $(c_2)$  que transporte le noeud  $s$  par unité de temps.

donc on a :

$-\mathbf{Q}_l^{(c_1)}$  : le nombre de produit de type  $(c_1)$  que transporte le noeud  $l$  par unité de temps.

$-\mathbf{Q}_l^{(c_2)}$  : le nombre de produit de type  $(c_2)$  que transporte le noeud  $l$  par unité de temps.

donc on a :

$-\mathbf{Q}_k^{(c_1)}$  : le nombre de produit de type  $(c_1)$  que transporte le noeud  $k$  par unité de temps.

$-\mathbf{Q}_k^{(c_2)}$  : le nombre de produit de type  $(c_2)$  que transporte le noeud  $k$  par unité de temps.

donc on a :

$-\mathbf{q}_{sl}^{(c_1)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_1)$  à faire transiter de  $s$  vers  $l$ .

$-\mathbf{q}_{sl}^{(c_2)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_2)$  à faire transiter de  $s$  vers  $l$ .

$-\mathbf{q}_{sh}^{(c_1)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_1)$  à faire transiter de  $s$  vers  $h$ .

$-\mathbf{q}_{sh}^{(c_2)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_2)$  à faire transiter de  $s$  vers  $h$ .

$-\mathbf{q}_{ls}^{(c_1)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_1)$  à faire transiter de  $l$  vers  $s$ .

$-\mathbf{q}_{ls}^{(c_2)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_2)$  à faire transiter de  $l$  vers  $s$ .

$-\mathbf{q}_{lk}^{(c_1)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_1)$  à faire transiter de  $l$  vers  $k$ .

$-\mathbf{q}_{lk}^{(c_2)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_2)$  à faire transiter de  $l$  vers  $k$ .

$-\mathbf{q}_{kh}^{(c_1)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_1)$  à faire transiter de  $k$  vers  $h$ .

$-\mathbf{q}_{kh}^{(c_2)}$  : représente le nombre total d'unités du produit  $(c_2)$  à faire transiter de  $k$  vers  $h$ .

donc on a :

**La transition d'un noeud  $s$  vers noeud  $l$  :**

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $s$  vers noeud  $l$  est égal à :

$$\sum_{c \in C} q_{sl}^{(c)} = q_{sl}^{c_1} + q_{sl}^{c_2}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $s$  vers  $l$  égale à :

$$\sum_{c \in C} e_{sl}^{tc} q_{sl}^{(c)} = e_{sl}^{tc_1} q_{sl}^{c_1} + e_{sl}^{tc_2} q_{sl}^{c_2}$$

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $l$  vers noeud  $s$  est égal à :

$$\sum_{c \in C} q_{ls}^{(c)} = q_{ls}^{c_1} + q_{ls}^{c_2}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $l$  vers  $s$  égale à :

$$\sum_{c \in C} e_{ls}^{rc} q_{ls}^{(c)} = e_{ls}^{rc_1} q_{ls}^{c_1} + e_{ls}^{rc_2} q_{ls}^{c_2}$$

**La transition d'un noeud  $l$  vers noeud  $s$  :**

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $l$  vers noeud  $s$  est égal à :

$$\sum_{c \in C} q_{ls}^{(c)} = q_{ls}^{c_1} + q_{ls}^{c_2}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $l$  vers  $s$  égale à :

$$\sum_{c \in C} e_{ls}^{tc} q_{ls}^{(c)} = e_{ls}^{tc_1} q_{ls}^{c_1} + e_{ls}^{tc_2} q_{ls}^{c_2}$$

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $s$  vers noeud  $l$  est égal à :

$$\sum_{c \in C} q_{sl}^{(c)} = q_{sl}^{c_1} + q_{sl}^{c_2}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $s$  vers  $l$  égale à :

$$\sum_{c \in C} e_{sl}^{rc} q_{sl}^{(c)} = e_{sl}^{rc_1} q_{sl}^{c_1} + e_{sl}^{rc_2} q_{sl}^{c_2}$$

**La transition d'un noeud  $s$  vers noeud  $h$  :**

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $s$  vers noeud  $h$  est égal à :

$$\sum_{c \in C} q_{sh}^{(c)} = q_{sh}^{c_1} + q_{sh}^{c_2}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $s$  vers  $k$  égale à :

$$\sum_{c \in C} e_{sh}^{tc} q_{sh}^{(c)} = e_{sh}^{tc_1} q_{sh}^{c_1} + e_{sh}^{tc_2} q_{sh}^{c_2}$$

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $h$  vers noeud  $s$  est égal à :

$$\sum_{c \in C} q_{hs}^{(c)} = 0$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $s$  vers  $h$  égale à :

$$\sum_{c \in C} e_{hs}^{rc} q_{hs}^{(c)} = 0$$

**La transition d'un noeud  $l$  vers noeud  $k$  :**

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $l$  vers noeud  $k$  est égal à :

$$\sum_{c \in C} q_{lk}^{(c)} = q_{lk}^{c_1} + q_{lk}^{c_2}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $l$  vers  $k$  égale à :

$$\sum_{c \in C} e_{lk}^{tc} q_{lk}^{(c)} = e_{lk}^{tc_1} q_{lk}^{c_1} + e_{lk}^{tc_2} q_{lk}^{c_2}$$

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $k$  vers noeud  $l$  est égal à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{q}_{kl}^{(c)} = \mathbf{0}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $k$  vers  $l$  égale à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{kl}^{rc} \mathbf{q}_{kl}^{(c)} = \mathbf{0}$$

**La transition d'un noeud  $k$  vers noeud  $h$  :**

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $k$  vers noeud  $h$  est égal à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{q}_{kh}^{(c)} = \mathbf{q}_{kh}^{c_1} + \mathbf{q}_{kh}^{c_2}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $k$  vers  $h$  égale à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{kh}^{tc} \mathbf{q}_{kh}^{(c)} = \mathbf{e}_{kh}^{tc_1} \mathbf{q}_{kh}^{c_1} + \mathbf{e}_{kh}^{tc_2} \mathbf{q}_{kh}^{c_2}$$

-Le nombre de produits qui vont transiter d'un noeud  $h$  vers noeud  $k$  est égal à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{q}_{hk}^{(c)} = \mathbf{0}$$

-L'énergie nécessaire pour transporter tous les produits de  $h$  vers  $k$  égale à :

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{hk}^{rc} \mathbf{q}_{hk}^{(c)} = \mathbf{0}$$

La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission de produits vers tous les noeuds accessibles depuis  $s$  (c-à-d.les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_s$ ) est :

$$\sum_{l \in \mathbf{S}_s} \sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{e}_{sl}^{tc} \mathbf{q}_{sl}^{(c)} = \mathbf{e}_{sl}^{tc_1} \mathbf{q}_{sl}^{c_1} + \mathbf{e}_{sl}^{tc_2} \mathbf{q}_{sl}^{c_2} + \mathbf{e}_{sh}^{tc_1} \mathbf{q}_{sh}^{c_1} + \mathbf{e}_{sh}^{tc_2} \mathbf{q}_{sh}^{c_2}$$

La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission de produits vers tous les noeuds accessibles depuis  $l$  (c-à-d. Les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_l$ ) est :

$$\sum_{l \in \mathbf{S}_l} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ls}^{rc} q_{ls}^{(c)} = e_{ls}^{rc_1} q_{ls}^{c_1} + e_{ls}^{rc_2} q_{ls}^{c_2}$$

La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission de produits vers tous les noeuds accessibles depuis  $l$  (c-à-d. les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_l$ ) est :

$$\sum_{l \in \mathbf{S}_l} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{ls}^{tc} q_{ls}^{(c)} = e_{ls}^{tc_1} q_{ls}^{c_1} + e_{ls}^{tc_2} q_{ls}^{c_2} + e_{lk}^{tc_1} q_{lk}^{c_1} + e_{lk}^{tc_2} q_{lk}^{c_2}$$

La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission de produits vers tous les noeuds accessibles depuis  $s$  (c-à-d. les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_s$ ) est :

$$\sum_{l \in \mathbf{S}_s} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{sl}^{rc} q_{sl}^{(c)} = e_{sl}^{rc_1} q_{sl}^{c_1} + e_{sl}^{rc_2} q_{sl}^{c_2}$$

-La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission de produits vers tous les noeuds accessibles depuis  $k$  (c-à-d.les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_k$ ) est :

$$\sum_{l \in \mathbf{S}_k} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{kh}^{tc} q_{kh}^{(c)} = e_{kh}^{tc_1} q_{kh}^{c_1} + e_{kh}^{tc_2} q_{kh}^{c_2}$$

-La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission de produits vers tous les noeuds accessibles depuis  $s$  (c-à-d.les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_s$ ) est :

$$\sum_{l \in \mathbf{S}_s} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{kl}^{rc} q_{kl}^{(c)} = e_{kl}^{rc_1} q_{kl}^{c_1} + e_{kl}^{rc_2} q_{kl}^{c_2}$$

-La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission de produits vers tous les noeuds accessibles depuis  $h$  (c-à-d.les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_h$ ) est :

$$\sum_{l \in \mathbf{S}_h} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{hk}^{tc} q_{hk}^{(c)} = 0$$

-La somme de toutes les énergie consommées dans la transmission de produits vers tous les noeuds accessibles depuis  $s$  (c-à-d.les noeuds de l'ensembles  $\mathbf{S}_s$ ) est :

$$\sum_{l \in \mathbf{S}_s} \sum_{c \in \mathbf{C}} e_{sh}^{rc} q_{sh}^{(c)} = e_{sh}^{rc_1} q_{sh}^{c_1} + e_{sh}^{rc_2} q_{sh}^{c_2} + e_{kh}^{rc_1} q_{kh}^{c_1} + e_{kh}^{rc_2} q_{kh}^{c_2}$$

donc on a :

**Maximize**  $T$

$$\text{s.t } \hat{q}_{sl}^{(c)} \geq 0, \forall s \in \mathbf{N}, \forall l \in \mathbf{S}_s, \forall c \in \mathbf{C}.$$

$$e_{sl}^{tc1} \hat{q}_{sl}^{c1} + e_{sl}^{tc2} \hat{q}_{sl}^{c2} + e_{sh}^{tc1} \hat{q}_{sh}^{c1} + e_{sh}^{tc2} \hat{q}_{sh}^{c2} + e_{ls}^{rc1} \hat{q}_{ls}^{c1} + e_{ls}^{rc2} \hat{q}_{ls}^{c2} \leq E_s.$$

$$e_{ls}^{tc1} \hat{q}_{ls}^{c1} + e_{ls}^{tc2} \hat{q}_{ls}^{c2} + e_{lk}^{tc1} \hat{q}_{lk}^{c1} + e_{lk}^{tc2} \hat{q}_{lk}^{c2} + e_{sl}^{rc1} \hat{q}_{sl}^{c1} + e_{sl}^{rc2} \hat{q}_{sl}^{c2} \leq E_l.$$

$$e_{lk}^{rc1} \hat{q}_{lk}^{c1} + e_{lk}^{rc2} \hat{q}_{lk}^{c2} + e_{kh}^{tc1} \hat{q}_{kh}^{c1} + e_{kh}^{tc2} \hat{q}_{kh}^{c2} \leq E_k.$$

$$e_{sh}^{rc1} \hat{q}_{sh}^{c1} + e_{sh}^{rc2} \hat{q}_{sh}^{c2} + e_{hk}^{rc1} \hat{q}_{hk}^{c1} + e_{hk}^{rc2} \hat{q}_{hk}^{c2} \leq E_h.$$

$$\sum_{l:s \in S_l} \hat{q}_{ls}^{(c)} + TQ_s^{(c)} = \sum_{l \in S_s} \hat{q}_{sl}^{(c)}, \forall s \in \mathbf{N} - \mathbf{D}^{(c)}, \forall c \in \mathbf{C}$$

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Avec le développement rapide des systèmes électroniques et de communication sans fil, la technologie des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) est devenue une révolution scientifique dans le domaine des communications sans fil. Les nœuds des réseaux de capteurs peuvent comporter différents types de capteurs, tels que les capteurs sismiques, thermiques, visuels, infrarouges, acoustiques et radar, qui sont capables de surveiller une grande variété de phénomènes ambiants. Ils peuvent être utilisés pour la surveillance continue d'un phénomène, la détection d'événements, l'identification d'événements ou encore la surveillance d'une position ou emplacement donné. Le concept de micro-capteurs interconnectés via un support sans fil ouvre la voie vers de nombreux et nouveaux domaines d'applications qui peuvent être catégorisés en des domaines touchant au militaire, à l'environnement, la santé, les milieux ambiants (maisons) ainsi qu'à d'autres applications commerciales.

La consommation d'énergie est un problème majeur avec le réseau de capteurs sans fil. Étant donné que les nœuds de capteurs alimentés par batterie sont fortement limités dans l'alimentation électrique, il est nécessaire d'étudier des méthodes d'optimisation de l'alimentation pour prolonger la durée de vie d'un réseau de capteur sans fil. Dans ce travail, on a modélisé le problème de maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil comme un programme linéaire qui est par la suite facile à résoudre avec les logiciels d'optimisation existants.

---

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf>.04/03/2021
- [2] **Auteur** = S .belkheyr. **Titre** = Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil. **Lieu** = Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen. **Année** = 2013.
- [3] Basics of Wireless Sensor Networks (WSN) | Classification, Topologies, Applications.18/04/2021
- [4] **Auteur** = N.Ould Mohamedi. **Titre** = Tolérance aux pannes d'une station de base (SINK) dans un réseau de capteurs sans fil. **Lieu** = Université Ferhat Abbas–Setif.
- [5] **Auteur** = K, Rahim. **Titre**=Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. **Lieu**=Université de Toulouse. **Date**= 28/09/2009.
- [6] **Auteur** = T. A Mounir. **Titre**= Proposition d'un protocole à économie d'énergie dans un réseau hybride GSM et AD HOC. **Lieu**=Université d'Oran **Année**= 2011/2012.
- [7] **Auteur**=Y, Nadine. **Titre**=La qualité de service des services multimédia sur les réseaux ad hoc sans fil à multi-sauts. l'école de technologie supérieure. **Date** =7/08/2009.
- [8] **Auteur** = S, Athmant. **Titre** = Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil.Université Hadj Lakhder-Batna.

- [9] **Auteur** = Vandana Jindal. **Titre** = D.A.V College Bathinda.History and Architecture of Wireless Sensor Networks for Ubiquitous Computing.
- [10] **Auteur** = D. Oussama. **Titre** = Implementation d'une strategie de routage multi-niveau de données d'un réseau de capteurs ANS fil dans le domaine ferroviaire. **Lieu** = Université du QUÉBEC. **Date** = Juin 2014.
- [11] **Auteur** = S. Messai. **Titre** = Gestion de la Mobilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil. **Lieu** = l'université Ferhat Abbas Sétif 1 et l'université Claude Bernard Lyon 1. **Date** = 24/11/2019.
- [12] **Auteur** = Ada Gogu<sup>1</sup> Dritan Nace<sup>1</sup>, Arta Dilo<sup>2</sup> and Nirvana Meratnia<sup>2</sup>. **Titre** = Review of Optimization Problems in Wireless Sensor Networks. **Lieu** = University of Twente, France, The Netherlands.
- [13] **Auteur** = Joongseok Park Sartaj Sahni. **Titre** = Maximum Lifetime Routing In Wireless Sensor Networks. Computer et Information Science et Engineering. **Lieu** = University of Florida jpark, sahani@cise. ufl. edu. **Date** = June 2, 2005.
- [14] NGN-AWSN (2014-02). Applications of Wireless Sensor Networks in Next Generation Networks. ITU-T. NGN-AWSN (2014-02)
- [15] <https://sites.google.com/site/topologiesdereseau/>, 18/04/2021
- [16] **Auteur** = B, Mehdi. **Titre** = Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. **Lieu** = Université du Maine. **Date** = 31/03/2016.
- [17] **Auteur** = Jae-Hwan Chang. **Titre** = Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, VOL. 12, NO. 4, **Date** = AUGUST 2004.
- [18] **Auteur** = A, Redha Mahlous, M.Tounsi. **Titre** = Operation Research Based Techniques in Wireless Sensors Networks. **Lieu** = Prince Sultan University, Riyadh, KSA.