

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



Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira  
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département du Mathématiques



# Mémoire de Master

Filière : Mathématiques

*Spécialité : Recherche Opérationnelle*

## Thème

---

Gestion optimale de l'énergie dans un réseau de  
capteurs sans fil

---

Présenté par :

- ABDI IMAN
- BACHIR OUAHIBA

Devant le jury composé de :

|  |           |     |                  |
|--|-----------|-----|------------------|
| <i>M<sup>r</sup></i> Hamid Karim       | Président | MAA | U. A/M/O Bouira. |
| <i>M<sup>r</sup></i> Hamdouni Omar     | Examineur | MAA | U. A/M/O Bouira. |
| <i>M<sup>r</sup></i> Demmouche Nacer   | Examineur | MCA | U. A/M/O Bouira. |
| <i>M<sup>r</sup></i> Iftissen Al Ghani | Encadreur | MAA | U. A/M/O Bouira. |

2021/2022



# Remerciements



A l'issu de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu ALLAH, le tout puissant, le miséricordieux, nous avoir donné la force, la santé et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Pendant toute la durée de nos études et de notre projet, on a eu la chance de côtoyer, de rencontrer des gens réellement extraordinaires. Qu'il nous soit permis ici de leur rendre humblement hommage et de les remercier pour tout ce qu'elles nous ont apporté : pour l'aide et les conseils qu'elles nous ont prodigué, pour leurs soutiens, dont on va citer :

✓ *Nos très chères familles qui ont été toujours derrière nous.*

✓ *Notre directeur de mémoire :*

○ *Mr. IFFTISSEN EL-Ghani*

*d'avoir accepté de nous encadrer, pour leurs orientations, conseils qui nous ont prodigué tout au long de ce travail.*

✓ *Je tiens à remercier les membres du jury :*

○ *Mr. Hamid Karim.*

○ *Mr. Hamdouni Omar.*

○ *Mr. Demmouche Nacer.*

*qui ont bien voulu investir de leur temps précieux pour lire mon mémoire.*

✓ *Un grand merci avec toute notre gratitude à notre chère secrétaire de département Sabrina pour son aide et son soutien de tous les instants.*

✓ *Nous ne manquons pas de remercier tous nos enseignants et le personnel du département de mathématique.*

✓ *Enfin, je finirai par exprimer mes remerciements à Tous nos amis et tous ceux qui ont étudié avec nous. tous ceux qu'ont aidé de près ou de loin pour aboutir à ce modeste travail.*

\*Ouahiba,Iman\*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ceux qui ont fait de moi ce que je suis, ceux grâce à qui tant d'années d'études ont été possibles, ceux envers qui j'ai une dette imprescriptible :*

*Ma très chère mère Fadila et le plus idéal père Mohammed au monde qui est le mien, que Dieu les garde pour moi.*

*À ma très chère sœur : Safia, En lui souhaitant un avenir radieux et plein de réussite.*

*À mes très chers frères : Faycel, Yazid et Marouane-hachani.*

*À mes charmantes nièces : Arije, Nour Insaffe, Lojine et Mariem, source d'espoir et de motivation.*

*À ma binôme : Ouahiba, à qui je souhaite bonne chance pour son prochain projet.*

*À tous mes amis qui m'ont encouragé, et à qui je souhaite plus de succès, tout particulièrement Bouchra, Feriel, Fatima, Khaoula...., à tous ceux que j'aime.*

*À notre encadreur et à tous les enseignants et le personnel de l'université de Bouira.*

*Abdi Iman*

# *Dédicaces*

*Avec une énorme joie, je dédie ce modeste travail à ceux qui sont très chers à mon cœur :*

*A la plus belle bougie qui a éclairé ma vie depuis ma naissance à ce jour, avec sa lumière douce j'ai pu parcourir ce chemin sous ses conseils et ses orientations et prières, à ma Mère.*

*A mon héros qui n'a jamais cessé de veiller à mon instruction et mon éducation, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs avec sa sagesse et sa tendresse de cœur, mon Père.*

*A mes très chers frères : Ahmed et Ismail , qui ne cesseront d'être à mes côtés.*

*A mes très chères sœurs : Saida, Fatiha et Samira qui m'apportent du courage et de la joie. Et mes adorables : Abdo, Mohammed, Zaki, Nidhal et Sohaib. Et mes princesses : Nada, Assil, Lyna et Ellin.*

*A ma jumelle et mon oreille attentive Samia, qui croit toujours en moi. Je l'aime beaucoup.*

*A tous les membres de ma famille BACHIR.*

*Ma binôme Iman, Mes sœurs de cœur Bouchra, Hadjira, Amina et Lyna. Et tous mes chers amis et mes collègues.*

*A tous ceux que j'aime et que je respecte.*

*Bachir Ouahiba*

# Abstract

The wireless sensor network is a set of nodes deployed in a capture area to sample physical quantities such as temperature, humidity, pressure, etc. The sensor nodes are powered by batteries that are usually irreplaceable and have limited capacity. The sensor nodes are powered by batteries that are generally irreplaceable and have limited capacity. This makes energy a critical resource to conserve in order to extend the life of the network. In our work, we have built a PLNE mathematical model, with the aim of extending the lifetime of a WSN, more precisely, to give an optimal path that maximizes the value of information by consuming as much as possible a minimum amount of energy. As there are several methods of solving ILP model, we have chosen the EXCEL SOLVER. This method allows us to find an optimal value for the proposed example.

**Key words :** wireless sensor network , Sensor networks, Optimisation, energy consumption, 0-1 integer linear programming, EXCEL SOLVEUR.

# Résumé

Le réseau de capteurs sans fil est un ensemble de nœuds déployés dans une zone de capture pour prélever des grandeurs physiques telles que la température, l'humidité, la pression, etc. Les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries généralement irremplaçables et à capacité limitée. Ceci rend l'énergie une ressource critique à conserver pour prolonger la durée de vie du réseau. Dans notre travail, nous avons construit un modèle mathématique PLNE, dans le but de prolonger la durée de vie d'un RCSF, plus précisément, donner un chemin optimale qui maximise la valeur de l'information en consommant autant que possible une quantité minimale de l'énergie. Comme il y'a plusieurs méthodes de résolution de modèle PLNE, nous avons choisis l'EXCEL SOLVEUR. Cette méthode nous permet de trouver une valeur optimale de l'exemple proposé.

**Mot clés :** Réseau de capteurs sans fils, nœud de capteur, Optimisation, économie d'énergie, programmation linéaire en nombres entiers, EXCEL SOLVEUR.

# Table des matières

|  |            |
|--|------------|
| <b>Abstract</b>  | <b>ii</b>  |
| <b>Résumé</b>  | <b>iii</b> |
| <b>Introduction générale</b>                                       | <b>ix</b>  |
| <b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils</b>         | <b>4</b>   |
| 1.1 Introduction . . . . .   | 4          |
| 1.2 Histoire des réseaux de capteurs . . . . .                     | 5          |
| 1.3 Principe et fonctionnement d'un RCSF . . . . .                 | 5          |
| 1.3.1 Description d'un RCSF . . . . .                              | 5          |
| 1.3.2 Architecture de communication d'un RCSF . . . . .            | 6          |
| 1.3.3 Types de communications dans RCSF . . . . .                  | 7          |
| 1.3.4 Modèles de délivrances des données . . . . .                 | 9          |
| 1.4 Architecture protocolaire de communication d'un RCSF . . . . . | 10         |
| 1.4.1 Les couches de la pile . . . . .                             | 10         |
| 1.4.2 Les plans de la pile . . . . .                               | 11         |
| 1.5 topologies des RCSFs . . . . .                                 | 11         |
| 1.5.1 Topologie en étoile . . . . .                                | 12         |
| 1.5.2 Topologie arborescente . . . . .                             | 12         |
| 1.5.3 Le réseau en anneau . . . . .                                | 13         |
| 1.5.4 Le réseau en bus . . . . .                                   | 13         |
| 1.6 La topologie maillée . . . . .                                 | 14         |
| 1.7 Domaine d'application des RCSFs . . . . .                      | 15         |
| 1.7.1 Application médicales et vétérinaires . . . . .              | 15         |
| 1.7.2 Application militaire . . . . .                              | 16         |
| 1.7.3 Application commerciales . . . . .                           | 17         |
| 1.7.4 Applications de surveillance . . . . .                       | 18         |
| 1.7.5 Applications environnementales et agricoles . . . . .        | 18         |
| 1.8 Caractéristiques des RCSF . . . . .                            | 19         |
| 1.9 Défis des réseaux de capteurs sans fil . . . . .               | 19         |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 1.10     | Contraintes dans la conception d'un réseau de capteurs . . . . . | 20        |
| 1.10.1   | Contraintes liées à l'application . . . . .                      | 20        |
| 1.10.2   | Contrainte énergétique . . . . .                                 | 20        |
| 1.10.3   | Contraintes liées aux déterminismes . . . . .                    | 21        |
| 1.10.4   | Contraintes de passage à l'échelle . . . . .                     | 21        |
| 1.10.5   | Contraintes liées à la qualité de service . . . . .              | 21        |
| 1.10.6   | Contraintes liées à la protection de l'information . . . . .     | 22        |
| 1.10.7   | Contraintes liées à l'environnement . . . . .                    | 22        |
| 1.10.8   | Contraintes de simplicité . . . . .                              | 22        |
| 1.11     | Conclusion . . . . .   | 22        |
| <b>2</b> | <b>Conservation de l'énergie dans les RCSFs</b>                  | <b>23</b> |
| 2.1      | Introduction . . . . .   | 23        |
| 2.2      | La consommation de l'énergie dans les RCSFs . . . . .            | 24        |
| 2.2.1    | Energie de capture . . . . .                                     | 24        |
| 2.2.2    | Energie de traitement (calcul) . . . . .                         | 24        |
| 2.2.3    | Energie de communication . . . . .                               | 24        |
| 2.3      | Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie . . . . .   | 25        |
| 2.3.1    | Module radio . . . . .   | 25        |
| 2.3.2    | Source de surconsommation d'énergie . . . . .                    | 25        |
| 2.3.3    | Routage des données . . . . .                                    | 26        |
| 2.4      | Conservation de l'énergie dans les RCSFs . . . . .               | 26        |
| 2.5      | La technique TDMA . . . . .                                      | 26        |
| 2.5.1    | C'est quoi un TDMA ? . . . . .                                   | 26        |
| 2.5.2    | Comment fonctionne le TDMA ? . . . . .                           | 27        |
| 2.5.3    | Les avantages de TDMA . . . . .                                  | 28        |
| 2.5.4    | Les inconvénients de TDMA . . . . .                              | 28        |
| 2.6      | Ordonnancement du sommeil . . . . .                              | 28        |
| 2.6.1    | Définition . . . . .   | 28        |
| 2.6.2    | Gestion de l'ordonnancement . . . . .                            | 29        |
| 2.7      | Conclusion . . . . .   | 30        |
| <b>3</b> | <b>Programmation linéaire en nombre entier</b>                   | <b>31</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .   | 31        |
| 3.2      | Optimisation en nombres entiers . . . . .                        | 32        |
| 3.2.1    | définition . . . . .   | 32        |
| 3.2.2    | La forme canonique et standard d'un PLNE . . . . .               | 32        |
| 3.3      | Présentation d'un solveur Excel . . . . .                        | 33        |
| 3.3.1    | définition . . . . .   | 33        |
| 3.3.2    | lancement de logiciel . . . . .                                  | 33        |
| 3.3.3    | Méthodes de résolution utilisée par le solveur . . . . .         | 33        |
| 3.3.4    | Les étapes suivis pour résoudre un PLNE . . . . .                | 34        |
| 3.4      | Conclusion . . . . .   | 37        |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>Modèle mathématique pour la gestion optimal de l'énergie</b> | <b>42</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 42        |
| 4.2      | Description du problème . . . . .                               | 43        |
| 4.2.1    | Fonction de l'énergie totale . . . . .                          | 46        |
| 4.2.2    | Fonction de latence totale . . . . .                            | 48        |
| 4.2.3    | Fonction objectif . . . . .                                     | 48        |
| 4.2.4    | Les contraintes du problème . . . . .                           | 49        |
| 4.3      | Application numérique . . . . .                                 | 51        |
| 4.3.1    | Énergie totale . . . . .  | 52        |
| 4.3.2    | Latence totale . . . . .  | 52        |
| 4.3.3    | La fonction objectif . . . . .                                  | 53        |
| 4.3.4    | Contraintes . . . . .   | 53        |
| 4.4      | Conclusion . . . . .  | 59        |

# Table des figures

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Architecture de communication d'un RCSF                          | 6  |
| 1.2  | fonctionnement d'un capteur                                      | 7  |
| 1.3  | Anatomie d'un nœud capteur                                       | 8  |
| 1.4  | Types de communications dans un RCSF                             | 8  |
| 1.5  | La pile protocolaire d'un RCSF                                   | 10 |
| 1.6  | WSN  | 12 |
| 1.7  | Topologie en étoile  | 12 |
| 1.8  | Topologie arborescente   | 13 |
| 1.9  | Topologie en anneau  | 13 |
| 1.10 | Topologie en anneau bus  | 14 |
| 1.11 | Topologie en maillée   | 14 |
| 1.12 | Applications des RCSFs   | 15 |
| 1.13 | Applications médicales de RCSFs                                  | 16 |
| 1.14 | Applications militaires des RCSFs                                | 17 |
| 2.1  | Diagrammes représentant le protocole TDMA.                       | 27 |
| 2.2  | Trois approches algorithmiques pour l'ordonnancement d'activité. | 30 |
| 3.1  | Les données numériques du modèle                                 | 37 |
| 3.2  | Trouver la valeur Z.   | 38 |
| 3.3  | les contraintes du modèle.                                       | 38 |
| 3.4  | La boîte de dialogue «Paramètres du solveur » à l'ouverture.     | 39 |
| 3.5  | La boîte de dialogue « Ajouter une contrainte »                  | 39 |
| 3.6  | La boîte de dialogue « Paramètres du solveur ».                  | 40 |
| 3.7  | boîte de dialogue « Résultat du solveur ».                       | 40 |
| 3.8  | La solution optimale obtenue du solveur.                         | 41 |
| 4.1  | Exemple d'un RCSF  | 44 |
| 4.2  | Exemple d'un RCSF avec 3 nœuds sources sink.                     | 51 |

## *Liste des abréviations*

|             |   |
|-------------|---|
| <b>RCSF</b> | Réseau de Capteurs Sans Fil.                  |
| <b>WSN</b>  | Wireless sensor network.                      |
| <b>ADC</b>  | Analog to Digital Converter.                  |
| <b>Sink</b> | puits ou station de base .                    |
| <b>OSI</b>  | Open Systems Interconnection.                 |
| <b>MAC</b>  | Media Access Control.                         |
| <b>CNRS</b> | Centre National de la Recherche Scientifique. |
| <b>TDMA</b> | Time Division Multiple Access.                |
| <b>FDMA</b> | Frequency Division Multiple Access.           |
| <b>RF</b>   | Radio Fréquence.                              |
| <b>AMRF</b> | Accès Multiple à Répartition en Fréquence.    |
| <b>IA</b>   | Intelligence Artificielle.                    |
| <b>PLNE</b> | Programmation Linéaire en Nombres Entiers.    |
| <b>PL</b>   | Programmation Linéaire.                       |
| <b>Vol</b>  | Valeur d'Information.                         |

# Introduction générale

Les progrès récents dans le domaine de la micro-fabrication et des technologies de communication sans fil, ont donné naissance à une nouvelle génération de réseaux, il s'agit des réseaux de capteurs sans fil (RCSF ou WSN) .

Les réseaux de capteurs sans fil sont généralement constitués de centaines, voire des milliers ou des millions d'entités autonomes miniaturisées, appelées nœuds capteurs. Ces capteurs sont dotés de capacité de calcul qui facilite la réalisation des applications non réalisables avant quelques années. Ils communiquent entre eux par ondes radio et se déploient dans des environnements complexes, hostiles où la présence humaine est quasiment impossible. Le but général d'un RCSF est la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement entourant ces capteurs, tel que la température, l'humidité, ou vibration..., les traiter et les acheminer vers une station de base (appelée en général Sink) dans laquelle une éventuelle analyse et une prise de décision pourront être effectuées[33].

Ces réseaux sont employés dans divers domaines d'applications tels que la médecine, la sécurité, la surveillance environnementale etc. En parallèle, des perspectives d'amélioration et des recherches sont en cours pour régler de multiples contraintes liées aux RCSF telles que la durée de vie du réseau (assuré la connectivité et la couverture), la sécurité, la défaillance des nœuds de capteurs (des cassures, des pannes physique etc.).

Un nœud capteur est muni de quatre unités principales à savoir : l'unité de capture pour collecter les données de l'environnement, l'unité de calcul pour traiter ces données collectées et exécuter les différentes procédures, l'unité d'énergie (généralement une batterie) pour la répartition de l'énergie disponible aux autres unités et l'unité radio. Cette dernière est composée d'un circuit pour l'émission des messages, d'un autre pour la réception des messages et d'un circuit pour amplifier le signal émis selon la distance de communication. Notons que c'est cette dernière unité qui consomme le plus d'énergie et principalement pour l'émission. Selon les applications, il peut y avoir d'autres unités supplémentaires telles que l'unité de localisation (GPS par exemple), l'unité de mobilité pour permettre à un nœud capteur de se déplacer dans l'espace de déploiement et l'unité de génération

de puissance à partir de l'environnement (énergie solaire, vibrationnelle, éolienne, etc.)[33].

En revanche, les réseaux de capteurs souffrent de leurs fragilités et de leurs énergies limitées. Les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries limités en énergie. Par ailleurs, le remplacement des batteries n'est pas une solution envisageable pour ces derniers. Toutefois, la mort d'un ou plusieurs nœuds capteurs interrompt partiellement la communication dans le réseau. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs sans fil, puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des nœuds capteurs et celle du réseau en entier. De ce fait, une partie des données collectées sera perdue, ce qui en résulte à la mort partielle du réseau.

Dans ce mémoire, nous intéressons à concevoir un programme linéaire en variables 0- 1 d'après l'idée de bidoki dans l'article [24], dont l'objectif est l'économie d'énergie dans un RCSF. Plus particulièrement le problème de minimisation de l'énergie et la latence en utilisant la programmation linéaire en nombre entiers. L'objectif principal c'est l'utilisation de EXCEL SOLVER pour trouver une durée de vie du réseau maximale. Nous proposons un réseau de 3 type de nœuds statique(nœuds sources S, nœuds relais V, et un sink), ce dernier fonctionne dans un temps T. La technique TDMA assure la division du temps T au slots égaux t distribué aux nœuds de réseau. Dans un instant t le nœud i reçoit, envoi où détecte des données avec une consommation d'énergie  $g(i,r)$ ,  $g(i,c)$  et  $g(i,s)$  successivement.

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

✓ Le premier chapitre présente d'une manière générale les notions de base sur les réseaux de capteurs sans fil, afin d'en comprendre les principes de ce type de réseaux, l'architecture et les domaines d'applications. Nous introduisons aussi quelques défis aussi que la localisation, routage et l'efficacité énergétique qui est la contrainte la plus importante dans ce type de réseaux.

✓ Dans le deuxième chapitre nous décrivons aussi le modèle de la consommation d'énergie par les différents composants d'un nœud capteur. Ce chapitre est basé aussi sur les techniques de conservation proposé par différents chercheurs pour augmenter la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. En terminant cette partie par une vue globale sur la technique TDMA qui assure la division du temps globale de réseau en intervalles (time-slot) attribués à chaque nœud et l'ordonnancement de sommeil.

✓ Le troisième chapitre est consacré aux techniques d'optimisation. Nous décrivons brièvement la programmation linéaire en nombre entier que nous avons utilisé pour modéliser notre problème. Nous avons présentés aussi la méthode de l'EXCEL SOLVER ainsi que la définition, les étapes de résoudre avec ce solveur.

✓ Dans le dernier chapitre nous détaillons notre contribution dans le cadre de cette thèse. Nous présentons la reformulation des travaux de bidoki [24], sous la

forme d'un programme linéaire en variables 0-1. Nous décrivons successivement : le problème, les paramètres, les variables, les contraintes ainsi que la fonction objectif. Nous détaillons les différentes augmentations qui peuvent être ajoutées à notre programme linéaire de base. À la fin, nous avons fourni un exemple sous forme de formulaire d'application et donné des solutions dans EXCEL.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

# Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils

## 1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sont considérés comme une famille particulière des réseaux ad hoc. Ce sont des réseaux sans fil composés d'un grand nombre de nœuds appelés capteurs interconnectés entre eux par une liaison sans fil via un canal radio. Ces nœuds communiqués entre eux pour capter, traiter et transmettre les informations collectées dans différents environnements. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée « champ de captage » correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté [5]. Les RCSFs sont de plus en plus utilisés dans des applications de surveillance de grands systèmes dans une variété de domaines [1] : le contrôle militaire (télésurveillance de champs de bataille, détection d'ennemis,...etc.), l'observation de l'environnement naturel (pollution, inondation...etc.), l'analyse biomédicale et la surveillance médicale (détection de cancer, rétine artificielle, taux de glucose, diabète,...etc.). L'habitat et le suivi d'écosystèmes (surveillance de niches d'oiseaux, croissance des plantes,...etc.)

Leurs remarquable essor est dû à leur taille de plus en plus réduite, leurs prix de plus en plus faible ainsi que leur support de communication sans fils attrayant peu encombrant mais également peu de ressources.

Les nœuds capteurs apparaissent comme des systèmes autonomes miniaturisés, mené d'une unité de traitement et de stockage de données, d'une unité de transmission sans fils et d'une batterie. Organisés sous forme de réseau, les nœuds capteurs d'un RCSF, malgré la limitation de leurs ressources de calcul, de stockage et surtout d'énergie, ont pour mission de récolter des données et les faire parvenir à une station de base .

Notre objectif dans ce chapitre est de donner une vue générale sur les réseaux de capteurs, leurs caractéristiques spécifiques, leurs types d'applications.

## 1.2 Histoire des réseaux de capteurs

Dans les années 1990, dans le monde de la recherche, est apparue une idée qui paraissait plutôt un rêve pour cette époque : imaginer un système nerveux central pour la Terre, capable de surveiller en temps réel les événements, ayant comme principaux bénéfices de pouvoir empêcher les accidents et d'économiser l'énergie. (Cette poussière intelligente a mis longtemps à apparaître) dit le professeur Pister, de l'Université de Californie à Berkeley. (J'ai inventé l'expression il y a 14 ans. La poussière vraiment futée a mis le temps, mais elle est finalement arrivée) [3].

Aujourd'hui les réseaux de capteurs sont devenus des systèmes pouvant atteindre un très grand nombre de nœuds, avec une zone de couverture déterminée et déployés d'une manière plus ou moins dense dans un environnement hétérogène dont on mesure ainsi son état global. Les derniers progrès en terme de miniaturisation, ainsi que le remplacement du câblage classique par des technologies de communication radio, ont généré de nouvelles catégories d'applications qui visent de nombreux domaines : l'aéronautique, l'automobile, le médical, l'environnement,...etc. De plus, les progrès des communications sans fil permettent aujourd'hui de répondre des exigences peu envisageables auparavant [4].

## 1.3 Principe et fonctionnement d'un RCSF

### 1.3.1 Description d'un RCSF

L'architecture des réseaux de capteurs fournit les prototypes nécessaires pour comprendre la relation entre le réseau de capteurs et les éléments utilisés. L'architecture est basée sur l'interaction entre les trois éléments suivants :

- **Nœud capteur** : Le rôle de capteur est de surveiller son environnement. Ce sont déployés dans la zone d'intérêt de façon aléatoire ou fixe.
- **zone de couverture (champ de captage ou d'intérêt)** : L'espace géographique où les capteurs agissent.
- **stations de base (Sink)** : Nommé aussi nœuds-puits où l'écoulement des données se termine. Il joue le rôle d'une passerelle et responsable de l'acheminement des informations collectées provenant des nœuds capteurs vers l'ordinateur centrale à travers un réseau de communication.

La figure ci-dessus présente un exemple classique de RCFS. L'interaction entre ces éléments suit une série d'opérations telles que le déploiement, la détection d'événements et le transfert de données tel que :

1. Les capteurs sont déployés de manière aléatoire ou fixe dans la zone d'intérêt.
2. Lorsque le capteur détecte un événement, il le traite localement pour obtenir des données sur cet événement.
3. La transmission des données acquises par le capteur est réalisée via une

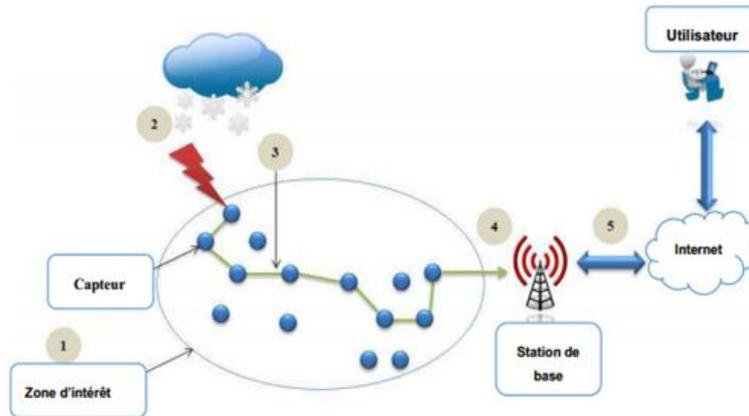


FIGURE 1.1 – Architecture de communication d'un RCSF

communication multi-sauts, où un chemin est créé lorsque le message se déplace à travers plusieurs nœuds.

4. La transmission des données se poursuit jusqu'à ce que la station de base soit atteinte ou que le flux de données se termine.
5. La station de base peut stocker localement les données des capteurs. Elle peut également rendre ces mesures disponibles en ligne à d'autres utilisateurs.

### 1.3.2 Architecture de communication d'un RCSF

#### Brève sur le nœud capteur

Un nœud capteur sans fil est un petit dispositif électronique doté d'un ou plusieurs capteurs qui sont capables de mesurer plusieurs valeurs physiques environnementales (température, lumière, pression, etc.) ou encore physiologiques (glycémie, tension, etc.) et les convertit dans une représentation analogique ou numérique FIGURE(1.2) .

Dans un RCSF deux types de nœuds sont reconnues logiquement :

**Nœuds de capteurs** : les nœuds dont la tâche principale est de transmettre ses propres données collectées.

**Nœuds relais** : les nœuds qui assurent essentiellement le reliage des paquets de données.

Chaque nœud capteur garantit trois fonctions principales : la collecte de l'information, son traitement et son acheminement vers un ou plusieurs points de collecte appelés puits [6].

Le nœud est composé de quatre unités :

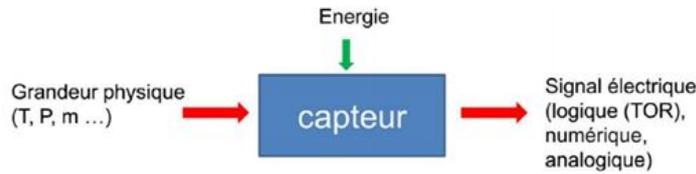


FIGURE 1.2 – fonctionnement d'un capteur

### ■ L'unité d'acquisition (de captage)

Est généralement composée de deux sous-unités : les capteurs et les convertisseurs analogique-numériques (ADC). Les capteurs obtiennent des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques[9].

### ■ Unité de traitement (calcul)

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[8].

### ■ Unité de communication (transmission)

Cette unité est responsable de toutes les émissions et les réceptions de données via un support de communication sans fil et une antenne. Généralement, les fréquences de communication varient entre 433 MHz et 2.4 GHz[6][7].

### ■ Unité d'énergie

Elle permet d'alimenter les différentes unités énumérées du nœud capteur décrites ci-dessus. L'énergie fournie par les batteries des capteurs est l'une des ressources les plus précieuses dans un RCSF, parce qu'elle influe directement sur la durée de vie des nœuds capteurs et donc du réseau entier. La consommation énergétique des capteurs est donc un des critères fondamentaux qu'il faut tenir en compte dans la conception et de déploiement d'un RCSF donné.

## 1.3.3 Types de communications dans RCSF

La communication dans un RCSF peut être classifiée en deux catégories :

- **Communication d'application** : concerne essentiellement les données captées ou les informations obtenues à partir des nœuds capteurs dans la perspec-

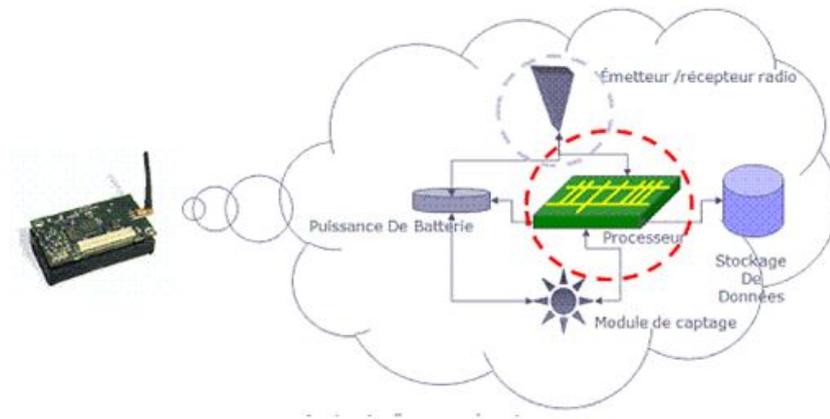


FIGURE 1.3 – Anatomie d'un nœud capteur

tive d'informer l'utilisateur final sur le phénomène observé. Deux modèles existent pour ce type de communication : modèle coopérative permettant aux nœuds capteurs de communiquer avec d'autres nœuds de capteurs pour satisfaire l'objectif de l'utilisateur final, et le modèle non coopérative dans lequel les nœuds capteurs n'ont pas besoins de coopérer pour la dissémination des données.

- **Communication d'infrastructure** : cette communication se réfère aux communications nécessaires pour configurer, maintenir et optimiser certains opérations. La communication d'infrastructure représente les messages de contrôles des protocoles réseau, il est donc important de la minimiser le plus possible tout en assurant une meilleure communication d'application.

En général les données d'un nœud capteur sont routées des nœuds sources vers le sink via les nœuds relais en créant une topologie Multi-sauts. Cette organisation logique permet de dégager quatre types de communications comme le montre la figure 1-4.

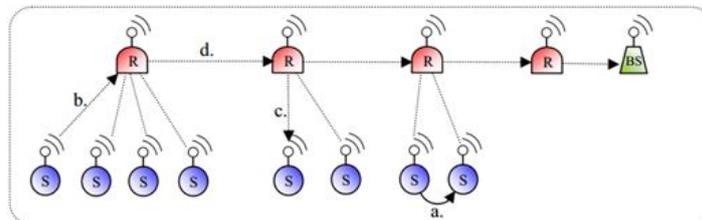


FIGURE 1.4 – Types de communications dans un RCSF

a/ **Communication de type nœud capteur à nœud capteur** : ce type de communication directe est utilisé dans les opérations locales entre nœuds

capteurs, par exemple durant les processus de mise en cluster ou de création de chemins de routage.

- b/ **Communication de type nœud capteur à nœud relais** : dans ce cas, les données collectées sont transmises du nœud capteur vers un nœud relais. Ce type de communication est souvent unicast.
- c/ **Communication de type nœud relais à nœud capteur** : elle est utilisée dans le cas de transmission, souvent multicast, de requêtes (données ou messages de signalisation) formulées par un utilisateur via le sink et certains nœuds relais pour atteindre un sous ensemble de nœuds capteurs à la fois.
- d/ **Communication de type nœud relais à nœud relais** : les nœuds relais forment en réalité l'épine dorsale d'un RCSF. La communication entre ces nœuds est dans la plupart des cas unicast. Ces nœuds sont capables d'effectuer cette activité de relai du moment que chacun deux est à priori équipé d'une interface sans fil de communication.

### 1.3.4 Modèles de délivrances des données

Les données ou les informations générées au niveau des nœuds capteurs peuvent être transmises vers l'utilisateur final ou le centre de traitement selon plusieurs modèles de délivrance : continu, dirigé par événements, à la demande ou hybride.

- ⊗ **Modèle continu** : les nœuds capteurs sont ordonnés de transmettre périodiquement les données captées tant qu'ils sont en vie. Le type de la requête est fortement persistant (par exemple rapporter les résultats de la capteur chaque 10 secondes). La délivrance des données n'est pas à temps critique.
- ⊗ **Modèle dirigé par événements** : les nœuds capteurs sont forcés de démarrer la capture des données seulement lorsqu'un événement se produit. Le type de la requête est dans ce cas faiblement persistant (par exemple transmettre une alerte lorsque la température dépasse un seuil de 200°F). La délivrance des données est à temps critique mais peut dépendre fortement des utilisateurs finaux/applications.
- ⊗ **Modèle à la demande** : parfois appelé modèle dirigé par des requêtes. Dans ce scénario, la capture des données par les nœuds capteurs est invoquée par des requêtes explicites transmises par l'utilisateur. Le type de la requête est instantané (par exemple, quelle est la température de la chambre A ?). La délivrance des données est à temps critique en général. Enfin, les trois modèles peuvent co-exister dans un même RCSF, nous parlons dans ce cas de modèle de délivrance hybride.

## 1.4 Architecture protocolaire de communication d'un RCSF

Une architecture en couches est utilisée pour assurer des fonctionnalités spécifiques et améliorer la force du réseau de capteurs sans fil, la figure 1-4 donne un aperçu de la pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres nœuds de capteurs du réseau. Cette pile contient cinq couches (couche application, couche de transport, couche réseau, couche liaison de données, couche physique) qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI, plus trois plan (plan de gestion de l'énergie, plan de gestion de la mobilité, plan de gestion des tâches).

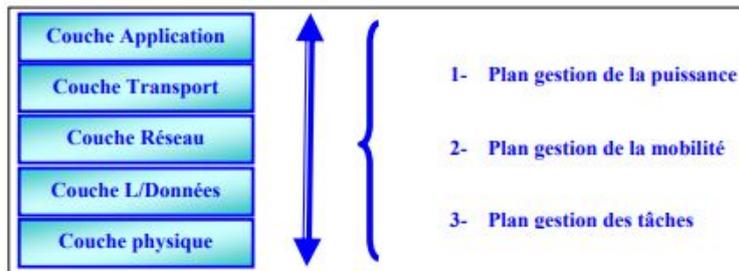


FIGURE 1.5 – La pile protocolaire d'un RCSF

### 1.4.1 Les couches de la pile

- ***Couche application***

Est utilisée pour la gestion du trafic et fournit des logiciels pour différents types d'applications. Ces applications sont utilisées pour envoyer des requêtes afin d'obtenir les informations du système[4].

- ***Couche transport***

Cette couche assure la communication Internet. Cette couche utilise plusieurs protocoles pour assurer la fiabilité du système et éviter la congestion du réseau.

- ***Couche réseau***

La couche réseau prend en charge différents types de protocoles de routage. Ces protocoles sont utilisés pour maintenir divers aspects fournies par la couche transport[4]. Il détermine le chemin optimal entre les nœuds capteurs et le nœud récepteur en termes d'énergie, de latence de transmission, de vitesse et d'autres facteurs. Pour assurer la redondance des données, les

WSN utilisent l'agrégation ou la fusion de données. L'agrégation de données combine les données provenant de différents nœuds et les transforme en informations significatives afin de réduire le besoin de redondance des données et d'économiser ainsi de l'énergie. La fusion de données est un concept plus avancé de l'agrégation de données qui est utilisé pour éliminer le bruit des données agrégées.

- ***Couche liaison de données***

Cette couche assure la fiabilité des données de point à multipoint. Il prend également en charge le contrôle des erreurs intervenues sur la couche physique. Il prend en charge les adresses MAC, qui sont les adresses matérielles des nœuds.

- ***Couche physique***

Cette couche assure la transmission et la réception des données au niveau bit. Il traite de la fréquence de transmission des données qui comprend la sélection de la fréquence, la génération de la fréquence porteuse pour la modulation, la détection du signal et la sécurité.

## 1.4.2 Les plans de la pile

- ***Le plan gestion de la puissance***

Il permet de préserver l'énergie en contrôlant l'utilisation de la batterie. Par exemple, un capteur se met en veille après la réception d'un message à partir d'un voisin dans le but d'éviter la duplication des messages déjà reçus. dans le cas où le niveau d'énergie devient bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage [4].

- ***Le plan de gestion de la mobilité***

Il assure le routage des données dans un réseau de capteurs mobile. il est capable d'enregistrer les mouvements du nœud afin de l'aider à se localiser [11].

- ***Le plan de gestion des tâches***

Étant donné que tous les nœuds du réseau n'ont pas besoin de fonctionner au même rythme, certains nœuds effectuent plus de tâches de détection que d'autres en fonction de leurs niveaux d'énergie. Les plans de gestion des tâches peuvent séquencer différentes tâches de collecte de données dans une zone spécifique pour assurer la coopération et un travail efficace en termes de consommation d'énergie [11].

## 1.5 topologies des RCSFs

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 :

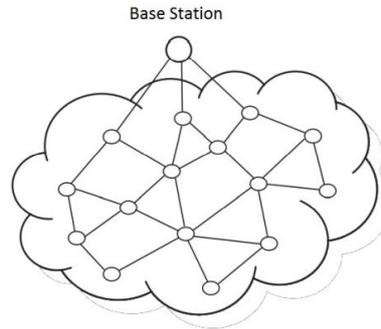


FIGURE 1.6 – WSN

### 1.5.1 Topologie en étoile

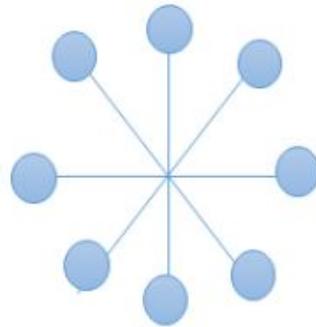


FIGURE 1.7 – Topologie en étoile

Dans la topologie en étoile, il existe un seul nœud central appelé concentrateur ou commutateur et chaque nœud du réseau est connecté à ce concentrateur. La topologie en étoile est très facile à mettre en œuvre, 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[13].

### 1.5.2 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[13].

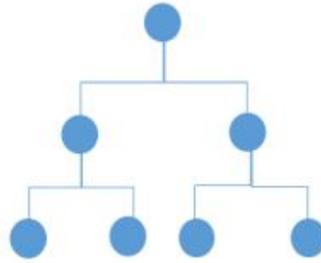


FIGURE 1.8 – Topologie arborescente

### 1.5.3 Le réseau en anneau

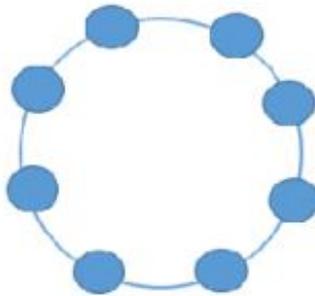


FIGURE 1.9 – Topologie en anneau

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 rémet 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 [26].

### 1.5.4 Le réseau en 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 :

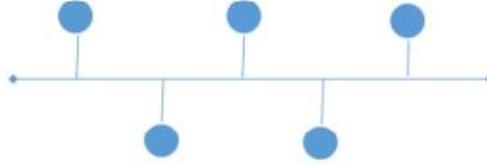


FIGURE 1.10 – Topologie en anneau bus

- 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 [26].

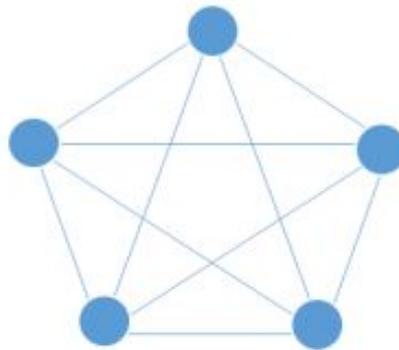


FIGURE 1.11 – Topologie en maillée

## 1.6 La topologie 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[13].

## 1.7 Domaine d'application des RCSFs

La diminution de taille et de coût des micro-capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations...) et l'évolution des support de communication sans fil, ont élargi le champ d'application des réseau de capteurs. Ils s'insèrent notamment dans d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaines de montage. Ils permettent de collecter et de traiter des informations complexes provenant de l'environnement (météorologie, étude des courants, de l'acidification des océans, de la dispersion de polluants, de propagules,... ect.) Certains prospectivistes pensent que les réseau de capteurs pourraient révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes, notamment dans les domaines militaires, environnemental, domestique, sanitaire, de la sécurité... [5]

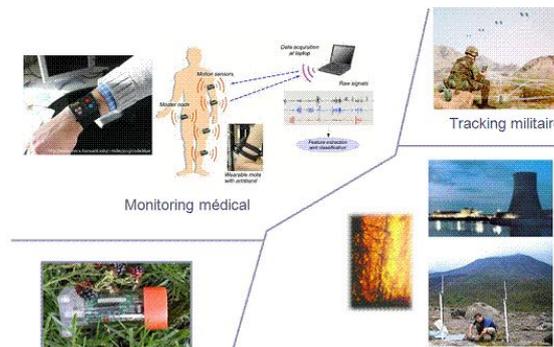


FIGURE 1.12 – Applications des RCSFs

### 1.7.1 Application médicales et vétérinaires

On peut trouver des applications qui fournissent des interfaces pour les handicapés, la surveillance intégrée d'un patient et le taux de médicaments qui leur ont été administrés, la surveillance des mouvements et les processus internes des insectes et les petits animaux [10]

La surveillance des fonctions vitales d'un organisme vivant pourrait à l'avenir être facilitée par des micro-capteurs avalés ou déployés sous la peau. Des gélules multi-capteurs ou des micro-caméras pouvant être avalées existantes déjà, pouvant sans recours à la chirurgie, transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain (avec une autonomie de 24 heures). Une étude récente présente des capteurs fonctionnant dans le corps humain, qui pourraient traiter certaines maladies. Un projet

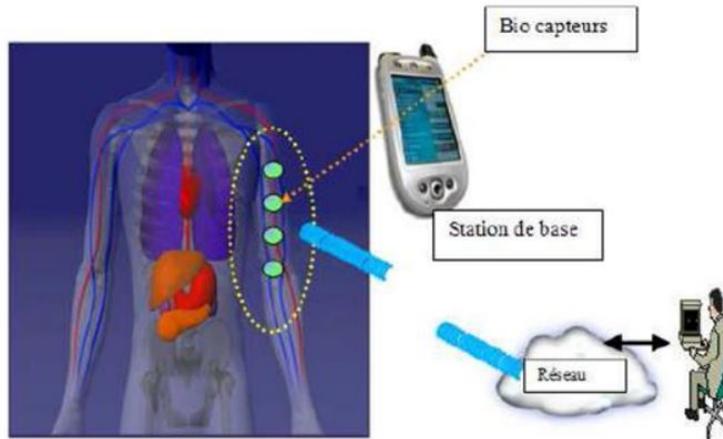


FIGURE 1.13 – Applications médicales de RCSFs

est de créer une rétine artificielle composée de 100 micro-capteurs pour corriger la vue. D'autres applications biomédicales ambitieuses sont également présentées, telles que : la surveillance de la glycémie, la surveillance des organes vitaux ou la détection précoce des cancers. Des réseaux de capteurs permettront théoriquement une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de quelques maladies [5].

### 1.7.2 Application militaire

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine.

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.

Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis), ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations) [5].

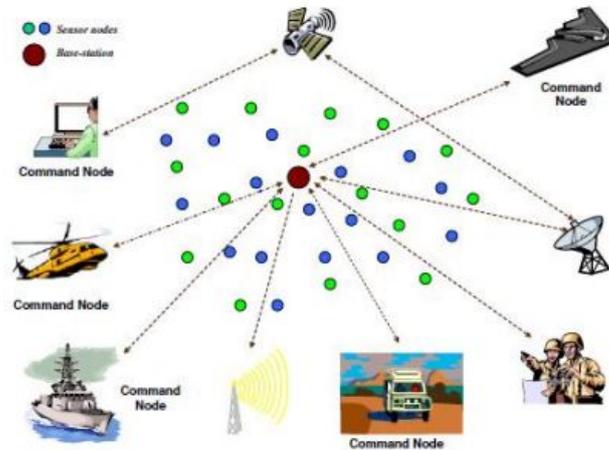


FIGURE 1.14 – Applications militaires des RCSFs

### 1.7.3 Application commerciales

Des nœuds capteurs pourraient améliorer le processus de stockage et de livraison (pour garantir la chaîne du froid en particulier). Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Un client attendant un paquet peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position du paquet. Des entreprises manufacturières, via des réseaux de capteurs pourraient suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts. Les produits en fin de vie pourraient être mieux démontés et recyclés ou réutilisés si les micro-capteurs en garantissent le bon état. Dans les immeubles, le système domotique de chauffage et climatisation, d'éclairage ou de distribution d'eau pourrait optimiser son efficacité grâce à des micro-capteurs présents dans les tuiles au plancher en passant par les murs, huisseries et meubles. Les systèmes ne fonctionneraient que là où il faut, quand il faut et à la juste mesure. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait de réduire la demande mondiale en énergie et indirectement les émissions de gaz à effet de serre. Rien qu'aux Etats-Unis, cette économie est estimée à 55 milliards de dollars par an, avec une diminution de 35 millions de tonnes des émissions de carbone dans l'air. Le monde économique pourrait ainsi diminuer ses impacts environnementaux sur le climat [5].

Les protocoles de routage peuvent être basés sur des facteurs tels que le routage plat, le routage hiérarchique, le routage par événement, le routage par requête ou le routage temporel. en fonction du type d'application dans laquelle le WSN est

déployé.

#### 1.7.4 Applications de 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 détection de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance. [35]

#### 1.7.5 Applications environnementales et agricoles

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermocapteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par 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. Cette expérimentation a été réalisée par Intel Research Laboratory and Agriculture and Agri-Food Canada sur une vigne à British Columbia. L'avantage principal de l'utilisation des RCSF dans l'agriculture est l'absence de câblage ce qui réduit considérablement le coût d'installation. Un autre avantage est la flexibilité de déploiement et la facilité d'entretien. En effet, les capteurs sont autonomes et nécessitent très peu d'intervention humaine sur les champs notamment dans le cas où les protocoles de communication sont tolérants aux panne et supportent la mobilité des nœuds. Plusieurs projets, [14], [14] et [15] ont utilisé la technologie des RCSF dans l'agriculture. Nous pouvons également prendre l'exemple du projet AGROSENS, lancé par le laboratoire Heudiasyc [35], qui signifie Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes, est une unité mixte de recherche entre l'Université de Technologie de Compiègne et le CNRS, qui a pour objectif l'étude et la conception d'une architecture de réseaux de capteurs sans fil (RCSF) pour le contrôle de l'environnement et le développement de pratiques d'agriculture de précision.

## 1.8 Caractéristiques des RCSF

Voici quelques-unes des propriétés d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) [16] :

- ⊗ Les ressources de calcul, de mémoire et d'énergie des capteurs sont limitées.
- ⊗ Durée de vie limitée.
- ⊗ Mode de communication : direct ou multi-sauts.
- ⊗ Haute densité de capteurs, qui pour certaines applications peut atteindre des dizaines de millions.
- ⊗ Le réseau peut être divisé en clusters et les capteurs peuvent être utilisés comme ordinateurs ou agrégateurs.
- ⊗ Collaboration de nœud de capteur pour des tâches complexes.
- ⊗ Les capteurs n'ont pas d'identifiant global.
- ⊗ Il existe deux modes de fonctionnement : « un à plusieurs », dans lequel la station de base diffuse des données à plusieurs capteurs, et « plusieurs à un », dans lequel les nœuds de capteurs transmettent des données à la station de base.

## 1.9 Défis des réseaux de capteurs sans fil

Dans la littérature, de nombreux travaux de recherche se concentrent sur la proposition de solutions efficaces et optimales à des défis des réseaux de capteurs sans fil, parmi lesquels on cite :

- ★ **Localisation** : Pour accomplir certaines applications des réseaux de capteurs sans fil comme le repérage des cibles et la détection des feux, il est nécessaire de connaître les positions des nœuds capteurs responsables de la détection de ces événements pour garantir une intervention dans le lieu et le temps convenables. Des contraintes comme la modification de la topologie et l'absence d'infrastructure influencent sur la localisation. Donc, il faut développer des algorithmes fiables et économes afin d'assurer une localisation efficace tout en minimisant la consommation énergétique.
- ★ **Synchronisation** : La synchronisation temporelle est une problématique importante dans les réseaux de capteurs sans fil à communication multi-saut car certaines applications de WSNs demandent une synchronisation des horloges locales des nœuds.
- ★ **Efficacité énergétique** : Les capteurs disposent des ressources énergétiques limitées (batterie). C'est qui fait de l'efficacité énergétique un facteur important dans la conception de tout capteur puisque le fonctionnement de WSN dépend fortement de la durée de vie des batteries de nœuds de capteurs. Alors il est très important d'optimiser l'énergie pour pouvoir étendre et prolonger cette durée.
- ★ **Routing** : Il s'agit de l'envoi des données sortant des nœuds sources jusqu'aux nœuds puits. Ces informations sont communiquées via un chemin multi-sauts pour atteindre leurs destinations. Il faut donc trouver le chemin

optimal le plus court et adopter des algorithmes de routage les plus efficaces afin d'assurer le routage des données en respectant le délai de transfert des paquets et les contraintes d'énergie.

## 1.10 Contraintes dans la conception d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs diffèrent des réseaux classiques où l'on peut être relativement générique et définir seulement un certain nombre de classes de service pour satisfaire le maximum de besoins. Ici, les contraintes sont plus nombreuses et empêchent la création d'un type spécifique du réseau de capteurs. Sans être exhaustif, voici une liste de contraintes possibles lors de la conception d'un réseau de capteurs.

### 1.10.1 Contraintes liées à l'application

Il est impossible aujourd'hui de créer un réseau de capteurs capable de répondre aux besoins de toutes les applications potentielles. On peut relever des mesures pour une infinité de situations et dans des environnements très variables tout en ayant une concentration faible ou forte des capteurs. Dans certains cas, il existe des applications qui nécessitent un grand nombre de capteurs pour être mises en place. La difficulté réside alors dans la recherche d'un dénominateur commun à toutes ces applications ce qui est pour l'instant très complexe et relève de l'impossible. C'est pourquoi, l'application devient le principal paramètre lors de la conception de protocoles très spécifiques pour que le fonctionnement des capteurs produise le résultat attendu par l'application en question. Il est impossible aujourd'hui de créer un réseau de capteurs capable de répondre aux besoins de toutes les applications potentielles. On peut relever des mesures pour une infinité de situations et dans des environnements très variables tout en ayant une concentration faible ou forte des capteurs. Dans certains cas, il existe des applications qui nécessitent un grand nombre de capteurs pour être mises en place. La difficulté réside alors dans la recherche d'un dénominateur commun à toutes ces applications ce qui est pour l'instant très complexe et relève de l'impossible. C'est pourquoi, l'application devient le principal paramètre lors de la conception de protocoles très spécifiques pour que le fonctionnement des capteurs produise le résultat attendu par l'application en question.

### 1.10.2 Contrainte énergétique

L'énergie est considérée comme la contrainte principale dans un réseau de capteurs. Déjà, comme pour tout réseau sans fil, il est important de tenir compte de cette contrainte car la plupart des machines fonctionnent sur batterie. Après la

décharge de la batterie, l'utilisateur est obligé de trouver une source électrique pour la recharger. Cependant, dans les réseaux de capteurs, il est pratiquement impossible de recharger de par le nombre élevé de capteurs déployés et de par la difficulté de l'environnement dans lesquels ils peuvent se trouver. On parle alors pour la pile ou la batterie d'âme du capteur. Une fois vide, le capteur est considéré comme mort ou hors service. L'objectif à atteindre devient l'augmentation de la durée de vie du réseau de capteurs. Ce paramètre peut être défini sous différentes formes telles que la consommation globale de tous les capteurs ou l'évitement qu'un capteur important perde son énergie ou la perte de la connectivité du réseau, etc.

### 1.10.3 Contraintes liées aux déterminismes

La plupart des réseaux de capteurs sont destinés à être déployés dans des environnements hostiles sur des sites industriels importants ou à opérer pendant des scénarios de crises. L'information que le capteur mesure doit parfois atteindre le collecteur d'informations en un temps borné bien défini. Au-delà de ce temps, l'information est considérée comme périmée ou non existante. Atteindre le déterminisme sur un réseau de capteurs sans fil n'est pas une tâche évidente. La raison vient du fait que pratiquement tous les standards de communication sans fil aujourd'hui utilisent des méthodes probabilistes pour accéder à cette interface radio.

### 1.10.4 Contraintes de passage à l'échelle

Le passage à l'échelle (scalability) indique que le réseau est suffisamment large et peut croître de manière illimitée. En d'autres termes, quand on passe à l'échelle, il est trop tard pour effectuer des mises à jour radicales au réseau. A chaque nouvel ajout, on doit prendre en considération les services existants et assurer leur pérennité. De plus, gérer un grand réseau par des humains devient une tâche difficile voire impossible à réaliser. Pour pouvoir opérer quand on passe à l'échelle, il faut que les capteurs soient capables de s'auto configurer seuls. L'auto-configuration peut aller de la simple attribution d'un identifiant jusqu'à l'application du protocole pour le bon fonctionnement du nœud dans son environnement. L'algorithmique distribué est la science la plus adaptée pour résoudre les problèmes du passage à l'échelle.

### 1.10.5 Contraintes liées à la qualité de service

La notion de qualité de service est légèrement différente ici de celle déployée dans les réseaux classiques. Souvent on parle de haut débit ou de faible débit, etc. Ici, avec des petits débits on peut parfois atteindre la qualité exigée. La qualité se définit par la capacité d'interpréter l'information collectée par le puits. Il n'existe donc pas de définition objective de la qualité. En fonction du réseau et du type de mesure, la qualité est alors précisée.

### 1.10.6 Contraintes liées à la protection de l'information

Comme pour tout réseau sans fil, l'information circule sur une interface partagée et non dédiée. N'importe quel intrus peut alors soit récupérer l'information, soit la modifier ou la rendre inexploitable. C'est pourquoi des mesures de sécurité doivent être mise en place pour protéger l'information. Cependant, tous les mécanismes de sécurité sont créés pour des réseaux où les nœuds disposent d'une forte capacité de traitement, ce qui n'est pas le cas des capteurs. A ce jour, très peu de solutions sont adaptées aux capteurs en termes de sécurité.

### 1.10.7 Contraintes liées à l'environnement

Les capteurs interagissent avec l'environnement où ils mesurent leurs grandeurs physiques. De façon générale, ces mesures sont relevées à des instants relativement espacés dans le temps puis soudainement, soit pour des raisons de catastrophe ou d'événement exceptionnel, ils se mettent en mode de forte fréquence de mesures et envoient de l'information en rafale. Il faut alors préparer le réseau à supporter ce type d'événement rare mais largement consommateur de ressources et sujet à des situations de congestions et de difficultés majeures.

### 1.10.8 Contraintes de simplicité

Enfin proposer des protocoles et des mécanismes simples et légers doit être la marque de fabrique du réseau de capteurs. Ces derniers sont de machines largement plus faibles qu'une machine de bureau ou même que des téléphones portables.

## 1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un état de l'art sur les RCSF. Nous avons présenté quelques concepts de base telle que la définition, l'architecture de communication, pile protocolaire, et caractéristique. Nous avons classé aussi les différents domaines d'applications.

Plusieurs défis et contraintes des réseaux de capteurs sans fil pour lesquels de nombreux travaux de recherches se concentrent sur la proposition des solutions efficaces et optimales. Parmi ces défis, nous citons l'efficacité énergétique qui est l'objet de chapitre suivant.

# Conservation de l'énergie dans les RCSFs

## 2.1 Introduction

De nombreux défis de recherche se posent dans la conception des RCSFs. Parmi eux, la réduction de la consommation d'énergie des nœuds de capteurs est de l'ensemble du réseau pour prolonger la durée de vie des RCSFs est essentielle des RCSF est d'une importance capitale. La raison en est que les nœuds de capteurs sont soumis à des contraintes énergétiques et ont une capacité de puissance limitée. De plus, la recharge ou le remplacement de la batterie dans les nœuds de capteurs n'est pas possible dans de nombreux cas. Il est donc nécessaire de trouver des techniques appropriées pour conserver l'énergie de ces nœuds. La détection, le traitement et la communication sont les trois principales sources de consommation d'énergie dans les nœuds de capteurs. Parmi ces trois opérations, la communication consomme plus d'énergie que les deux autres. Plusieurs méthodes de réduire la consommation d'énergie et améliorer la durée de vie d'un WSN sont présentées dans la littérature[18].

Dans ce qui suit nous discutons sur la consommation de l'énergie dans les RCSFs en citant les formes de son gaspillage, nous avons citer également les différents schémas d'économie d'énergie proposés par différents chercheurs pour augmenter la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil.

Nous allons également présenter la technique TDMA, son fonctionnement et ses avantages et inconvénients. Et nous terminons par une vision sur l'ordonnancement du sommeil qu'il est nécessaire pour le fonctionnement idéal du réseau et l'économie de l'énergie.

## 2.2 La consommation de l'énergie dans les RCSFs

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication [19].

### 2.2.1 Energie de capture

les causes de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture[20]. La plupart des chercheurs partent de l'idée que l'énergie consommée par l'échantillonnage des données est négligeable comparant à la communication. En revanche, dans certain cas, l'énergie dépensée pour l'échantillonnage peut être dans le même ordre de grandeur ou supérieure à l'énergie consommée lors de la communication. A titre d'exemple : l'utilisation d'un capteur gourmand en énergie, des capteurs actifs, tels que les capteurs d'image ou aussi dans le cas où le temps d'échantillonnage est longue [21].

### 2.2.2 Energie de traitement (calcul)

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication [22].

### 2.2.3 Energie de communication

L'énergie de communication se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur [22].

## 2.3 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

Il existe des facteurs qui induisent une consommation inutile de l'énergie [22] [21] :

### 2.3.1 Module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur le plus consommateur en énergie puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. Le module radio opère dans quatre modes de fonctionnement : idle (actif), transmission, réception et sommeil :

- \* **Mode actif** : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Ce mode gaspille de l'énergie en écoutant inutilement le canal de transmission.
- \* **Mode de transmission** : la radio transmet un paquet.
- \* **Mode de réception** : la radio reçoit un paquet.
- \* **Mode veille(sommeil)** : la radio est mise hors tension.

### 2.3.2 Source de surconsommation d'énergie

La couche MAC a un rôle très important pour la minimisation de l'énergie consommée. Les principales sources de consommation d'énergie au niveau de cette couche seront discutées dans les sections suivantes [23].

- **La retransmission** : Le même canal de transmission est partagé par tous les nœuds capteurs. De plus, la transmission simultanée de données à partir de plusieurs capteurs peut entraîner des collisions et, par conséquent, des pertes de données. Les informations perdues doivent être retransmises, ce qui consomme plus d'énergie.
- **Ecoute actif** : L'écoute du canal radio dans l'attente d'une éventuelle réception engendre une perte importante des capacités des nœuds en termes d'énergie. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. De ce fait, basculer les nœuds capteurs en mode sommeil est une solution mais la transition entre les modes consomme également de l'énergie. Pour cette raison la fréquence de transition entre les modes doit rester raisonnable.
- **L'écoute abusive (overhearing)** : L'écoute abusive se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Le coût de l'écoute abusive peut être important dans le cas d'un réseau dense et avec une charge de trafic importante.
- **La surcharge (Overhead)** : Plusieurs protocoles de la couche MAC, utilisent les paquets de contrôle pour maintenir une bonne communication entre les nœuds (signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès

et évitement de collisions). L'échange de paquets de contrôle nécessite une énergie additionnelle. Par ailleurs, comme ces paquets ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif.

- **Sur-transmission** : Cela se produit lorsqu'un nœud de capteur fournit des données à une destination qui n'est pas prête à les recevoir. Ces données transférées consomment beaucoup d'énergie qui n'est pas nécessaire.
- **La taille des paquets** : La taille des paquets a un effet sur la consommation d'énergie. En effet, si la taille des paquets est réduite, le nombre de paquets de contrôle échangés augmente ce qui génèrera un Overhead. Dans le cas contraire, une taille grande des paquets nécessite l'utilisation d'une grande puissance de transmission.

### 2.3.3 Routage des données

Le routage des données peut avoir un impact sur la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source à une destination se fait à travers des nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud capteur consomme de l'énergie soit pour transmettre ou relayer les données des autres nœuds. Dans ce sens, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau [21].

## 2.4 Conservation de l'énergie dans les RCSFs

Des expérimentations ont révélé que le transfert de données consomme le plus d'énergie, alors que les calculs eux-mêmes en consomment très peu. La consommation énergétique du module de détection est déterminée par la spécificité du capteur. Elle est souvent insignifiante par rapport à l'énergie nécessaire au module de traitement, notamment au module de communication. Dans certaines circonstances, l'énergie nécessaire à la détection est comparable ou supérieure à l'énergie nécessaire à la transmission des données. En général, les techniques de conservation de l'énergie sont divisées en deux catégories[35]. la gestion de l'énergie est prise en compte dans les opérations de chaque nœud, ainsi que dans la conception des protocoles de réseau), et le composant de détection (c'est-à-dire que des techniques sont utilisées pour réduire la fréquence d'échantillonnage énergivore).

## 2.5 La technique TDMA

### 2.5.1 C'est quoi un TDMA ?

L'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) est une technique de modulation numérique utilisée dans la téléphonie cellulaire numérique et la radio-

communication mobile. Le TDMA est l'une des deux façons de diviser le spectre limité disponible sur un canal cellulaire de radiofréquence (RF). Ainsi le FDMA [26].

En termes simples, le TDMA permet à plusieurs utilisateurs de partager la même fréquence en divisant chaque canal cellulaire en différents intervalles de temps. En fait, une seule fréquence supporte plusieurs canaux de données simultanés. Ainsi, avec un TDMA à deux tranches de temps, deux utilisateurs peuvent partager la même fréquence. Avec un TDMA à trois tranches de temps, trois utilisateurs peuvent partager la même fréquence et ainsi de suite [26].

Dans les RCSFs le TDMA permet de diviser le temps en intervalles (time-slot) attribués à chaque nœud (voir figure 2-1). Ainsi, un seul nœud a le droit d'accès au canal (il utilise toute la plage de la bande passante du canal), mais doit émettre ses données pendant les intervalles de temps qui lui sont accordés [27].

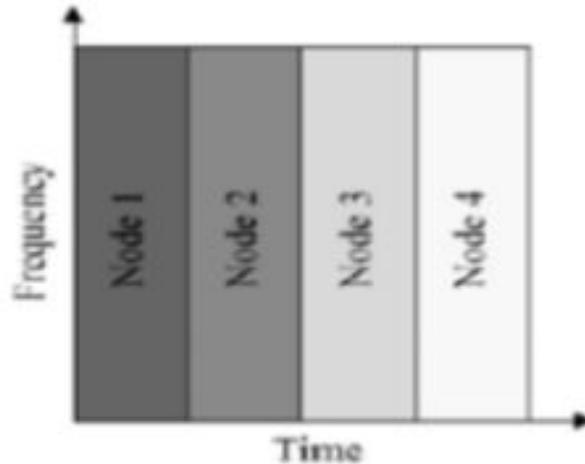


FIGURE 2.1 – Diagrammes représentant le protocole TDMA.

### 2.5.2 Comment fonctionne le TDMA ?

Dans le système TDMA, les utilisateurs émettent en succession rapide, chacun nœuds son propre slot. Ce processus de navette est si rapide que chaque nœuds pense occuper le même canal RF au même moment. En attribuant une quantité discrète de largeur de bande à chaque nœud, le TDMA augmente la quantité de données pouvant être transportées sur le canal, tout en permettant des conversations simultanées [26].

### 2.5.3 Les avantages de TDMA

Le TDMA divise le temps d'opération en tranches de temps qui sont attribuées à plusieurs nœuds. Ainsi, la largeur de bande disponible du canal est utilisée par chaque nœud et partagée séquentiellement dans le temps. Les nœuds se relaient pour utiliser le canal de manière efficace et opportune. Ainsi, par rapport aux systèmes analogiques, le TDMA améliore l'efficacité du spectre.

Tous les nœuds se voient attribuer des créneaux temporels qui ne se chevauchent pas pour utiliser le canal à tour de rôle. Cela permet d'éviter les interférences inter symboles, un phénomène indésirable dans lequel un symbole interfère avec les symboles suivants pour déformer le signal, ce qui réduit la fiabilité de la communication[26]. Le TDMA permet également des taux flexibles, où plusieurs créneaux horaires peuvent être attribués dynamiquement à un nœud.

De plus, comme la transmission n'est pas continue, l'émetteur peut être éteint lorsqu'il n'est pas utilisé. Il en résulte une faible consommation de batterie par rapport à l'AMRF.

### 2.5.4 Les inconvénients de TDMA

En TDMA, un intervalle de garde doit être ajouté entre les créneaux TDMA adjacents afin de réduire les interférences entre les transmissions et d'empêcher les transmissions qui se chevauchent. Ce court intervalle nécessite du temps et de l'énergie supplémentaires[26].

La synchronisation est également nécessaire en TDMA en raison du mode de transmission des données.

## 2.6 Ordonnancement du sommeil

### 2.6.1 Définition

Les réseaux de capteurs sont généralement denses et redondants. En effet, suivant l'application, on déploiera plus ou moins de capteurs dans un souci d'allongement de la durée de vie de l'application. À tout moment, il existe donc des capteurs qui observent une même portion de la zone de déploiement. Cette redondance est exploitée par l'ordonnancement d'activité.

- L'ordonnancer l'activité dans un réseau de capteurs consiste à alterner les périodes actives et les périodes de sommeil, durant lesquelles la radio est arrêtée afin d'économiser l'énergie. L'idée consiste à revenir à cet état sommeil dès que possible, tout en satisfaisant les exigences de l'application[24].
- L'ordonnancement du sommeil est une technique clé qui peut être employée dans les RCSFs pour non seulement réduire leur consommation d'énergie, mais aussi pour permettre aux nœuds de capteurs d'avoir suffisamment de temps pour se

recharge. Il permet d'économiser l'énergie consommée en raison de l'état d'écoute inactif.

### 2.6.2 Gestion de l'ordonnancement

L'ordonnancement d'activité peut se faire de diverses façons. Nous distinguons ici les approches centralisées (où une entité centrale connaît chaque nœud et est capable d'influer sur chacun pour lui assigner ses tâches) des approches hiérarchiques (une vision hiérarchisée du réseau où l'autorité centrale est démultipliée selon plusieurs entités responsables d'une sous-partie du réseau) et des approches localisées, par conséquent totalement décentralisées, dans lesquelles un comportement global cohérent doit être obtenu à partir de décisions prises localement.

- **Approche centralisée** : Dans les solutions d'ordonnancement centralisées, il faut pouvoir bénéficier d'une entité centrale ayant vue sur tout le réseau. Cette entité, représentée par un carré sur la figure 2.2(a), peut ainsi assigner à chaque objet un rôle. Les changements de topologie dus aux éventuelles pannes ou à la mobilité des nœuds sont scrutés de façon à pouvoir en informer les objets concernés. On trouve ce genre d'utilisation dans les applications de domotique où les capteurs sont chargés de fournir des informations au contrôleur central lui-même chargé de réguler les différents appareils de la maison. On retrouve également ces approches dans les applications de surveillance de structure, chargées de signaler toute anomalie dans l'édifice. Ces solutions d'ordonnancement ne sont donc adaptées que lorsque l'environnement peut être atteint et qu'une infrastructure existe ou peut y être déployée.

- **Approche hiérarchique** : Dans une approche hiérarchique, le réseau est organisé en sous-ensembles, chacun devant s'autogérer. Pour cela, diverses solutions existent telles que l'élection de chefs de ces sous-ensembles (les carrés sur la figure 2-2(b)) par exemple. Ce rôle peut être assigné à différents membres du sous-réseau de façon à répartir la charge de travail et à équilibrer les ressources disponibles. Dans un ordonnancement hiérarchique, les informations de changements de topologie ne sont propagées qu'au sein des sous-structures. Ceci en fait des solutions plus propices au passage à l'échelle. Contrairement à une approche centralisée ou la complexité exponentielle serait accumulée dans une seule entité, elle serait ici répartie sur les différents sous-ensembles du réseau. Il reste néanmoins problématique de gérer les appartenances à ces sous-ensembles et le passage éventuel de l'un à l'autre.

- **Approche localisée** : Les approches localisées ne reposent sur aucune infrastructure et n'ont pas vocation à hiérarchiser le réseau. L'objectif est d'obtenir un comportement global cohérent à partir de comportements individuels. Dans une approche localisée, chaque nœud décide de sa propre activité en ne se basant que sur l'observation de ses propres voisins. Aucune hiérarchie ni infrastructure

n'existe comme illustré sur la figure 2-2(c). Le comportement de chaque objet n'est influencé que par ceux de ses voisins directs. Les changements de topologie du réseau (dus à la mobilité, aux pannes ou à des changements de statut) ne sont par conséquent vécus par les nœuds que comme de simples modifications de leurs voisinages. Ceci permet d'obtenir des solutions robustes, adaptables et surtout passables à l'échelle, aspect extrêmement important dans des réseaux où les densités évoquées peuvent être d'une centaine de nœuds par zone de communication. C'est pourquoi nous avons choisi de travailler avec des approches localisées, totalement décentralisées.

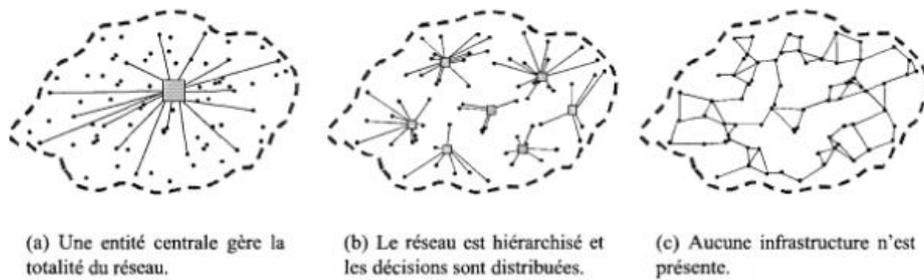


FIGURE 2.2 – Trois approches algorithmiques pour l'ordonnancement d'activité.

## 2.7 Conclusion

La durée de vie d'un réseau de capteur est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière dépend fortement de la consommation d'énergie du nœud capteur. Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques approches de conservation d'énergie, proposée dans la littérature, pour les réseaux de capteur sans fil. Après avoir souligné les principaux facteurs de consommation d'énergie.

Dans le chapitre suivant nous avons vu une vue générale sur l'optimisation combinatoire et la programmation linéaire en nombre entiers.

# Chapitre 3

## Programmation linéaire en nombre entier

### 3.1 Introduction

L'optimisation combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. Son importance se justifie d'une part par la grande difficulté des problèmes d'optimisation et d'autre part par de nombreuses applications pratiques pouvant être formulées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire. Bien que les problèmes d'optimisation combinatoire soient souvent faciles à définir, ils sont généralement difficiles à résoudre.

Etant donnée l'importance de ces problèmes, de nombreuses méthodes de résolution ont été développées en recherche opérationnelle (RO) et en intelligence artificielle (IA).

La programmation linéaire en nombres entiers est un outil puissant de modélisation de nombreux problèmes d'optimisation combinatoire peuvent être formulés comme des PLNE particuliers. Ainsi, un algorithme permettant de résoudre un PLNE permet de résoudre beaucoup de problèmes d'optimisation combinatoire. Il existe d'ailleurs de nombreux logiciels, appelés solveurs entiers, utilisés pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire pratiques (industrie, transport,...).

Nous présenterons dans la première partie l'optimisation combinatoire et principalement la programmation linéaire en nombres entiers que nous avons utilisée pour modéliser notre problème. Dans la deuxième partie nous présentons brièvement la méthode d'Excel solveur qui permet de donnée les solutions optimales de PLNE trouvée[33].

## 3.2 Optimisation en nombres entiers

### 3.2.1 définition

Un problème d'optimisation est un problème mathématique où, étant donné un ensemble de variables et de contraintes sur ces variables, on doit trouver une assignation qui maximise (ou minimise) une certaine fonction de coût. On parle de problème linéaire lorsque les contraintes et la fonction de coût sont combinaisons linéaires des variables, et le problème est à nombres entiers si ces variables ne sont autorisées qu'à prendre des valeurs dans l'ensemble des entiers [31]. La contrainte qui force les variables à prendre des valeurs entières est appelée contrainte d'intégralité. Lorsque l'on gomme cette contrainte, on parle d'un problème relaxé, et l'on a alors affaire à un problème d'optimisation linéaire avec :

\* Variables discrètes : Nombre d'objets à considérer, nombre d'actions à effectuer, etc

#### Exemples

- Nombres de vélos à installer sur le campus.
- Nombres d'ouvriers à affecter à un chantier.

\* Variables binaires (0/1) : oui/non, allumer/éteindre, etc.

#### Exemples

- Utiliser la voiture ou pas.
- Construire un pont ou pas.
- Allumer la climatisation ou pas.

Dans notre problème, nous besoins d'un PLNE avec des variables binaires.

### 3.2.2 La forme canonique et standard d'un PLNE

#### forme canonique

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} z = c^T x. \\ Ax = b \\ x_j \in \mathbb{R} \end{array} \right.$$

**forme standard**

$$\begin{cases} \text{Min} z = c^T x. \\ Ax + s \begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} b \\ x_j \in \mathbb{R} \end{cases}$$

Tel que  $c$ ,  $b$  sont des vecteurs et  $A$  est une matrice ayant des valeurs entières et  $s \in \mathbb{R}$ .

**3.3 Présentation d'un solveur Excel****3.3.1 définition**

Le Solveur est un complément Microsoft Excel que vous pouvez utiliser pour des analyse de scénarios. Le Solveur vous permet de trouver une valeur optimale (maximale ou minimale) pour une formule dans une seule cellule, appelée cellule objectif, en fonction de contraintes ou de limites appliquées aux valeurs d'autres cellules de la formule dans une feuille de calcul. Le Solveur utilise un groupe de cellules, appelées variables de décision ou simplement cellules variables, qui interviennent dans le calcul des formules des cellules objectif et de contraintes. Le Solveur affine les valeurs des cellules variables de décision pour satisfaire aux limites appliquées aux cellules de contraintes et produire le résultat souhaité pour la cellule objectif [34].

**3.3.2 lancement de logiciel**

Ce composant du logiciel Excel permet à résoudre numériquement des problèmes mathématiques. Pour lancer ce composant :

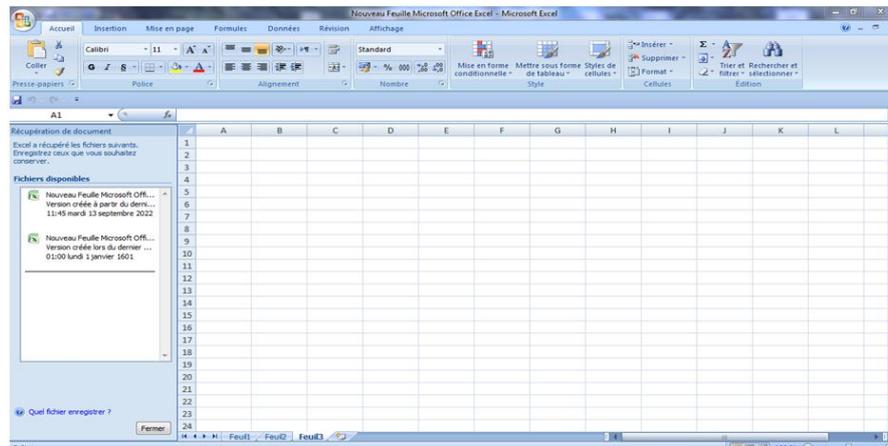
- Dans le cas de la version Microsoft Office 2003 on choisie de la barre du menu principal du logiciel Excel le sous-menu Tools et d'ici l'option Solver. Si il n'y a pas la, il doit insérer en suivant les pas : on clique sur Add-ins et on choisie Solver et puis OK.
- Dans le cas de la version Microsoft Office 2007 on enfonce Office Button, puis Excel Options.

De la fenêtre qui sera affichée on choisie compléments. Puis atteindre.

Choisis complément solver et OK. Dans le sous-menu donnée sera affiche Solver.

**3.3.3 Méthodes de résolution utilisée par le solveur**

Vous pouvez choisir n'importe lequel des trois algorithmes ou méthodes de résolution suivants dans la boîte de dialogue Paramètres du solveur :

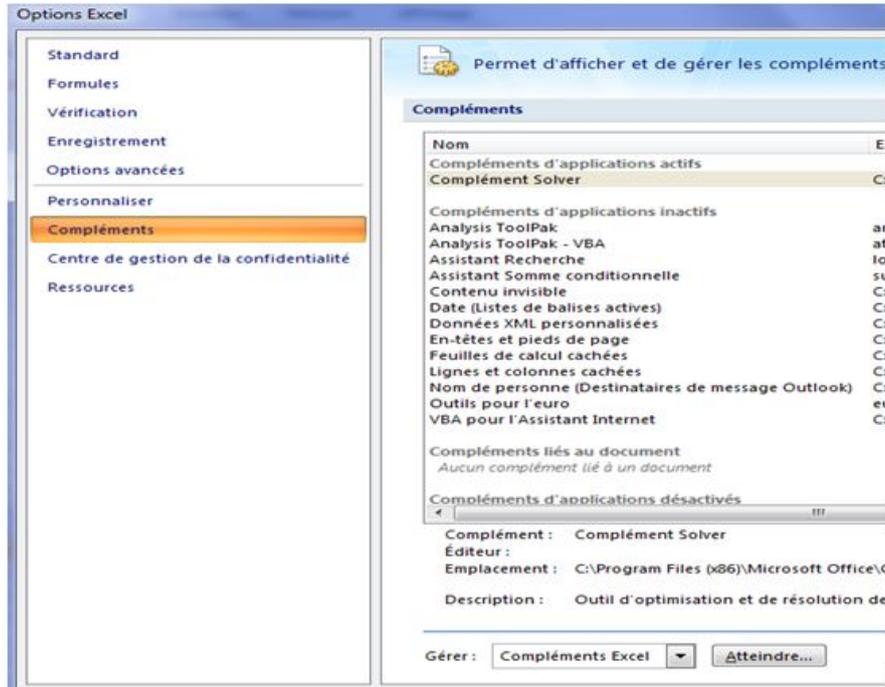


- **GRG non linéaire** : Destiné aux problèmes non linéaires simples.
- **Simplex PL** : Destiné aux problèmes linéaires.
- **Evolutionary** : Destiné aux problèmes complexes.

### 3.3.4 Les étapes suivis pour résoudre un PLNE

#### *Etape 01* : Saisie des données numériques

Il s'agit d'entrer les coefficients de la fonction-objectif et des contraintes. Pour faciliter l'interprétation des fichiers, nous convenons de placer ces nombres en tableau, les variables de décision les contraintes. La figure 1 donne la présentation que nous avons retenue pour les données numériques du modèle linéaire. Les lignes 1 à 6 servent seulement à documenter le fichier et ne seront pas utilisées par le solveur d'Excel (les dimensions  $m$  et  $n$  représentent, la 1<sup>re</sup>, le nombre de contraintes du modèle, la 2<sup>e</sup>, le nombre de variables de décision).



### Etape 02 : La structure du modèle linéaire

Nous avons présenté dans la figure (3.2) comment nous avons calculé la valeur  $z$  de la fonction-objectif et les membres gauches des contraintes.

- La formule « =SOMMEPROD( $c_j; x_j$ ) » reportée dans la cellule E16 signifie que la valeur de cette cellule sera égale à :

$$C_1 * X_1 + C_2 * X_2 + C_3 * X_3$$

- De même la cellule E21 définit la 1re contrainte comme la somme

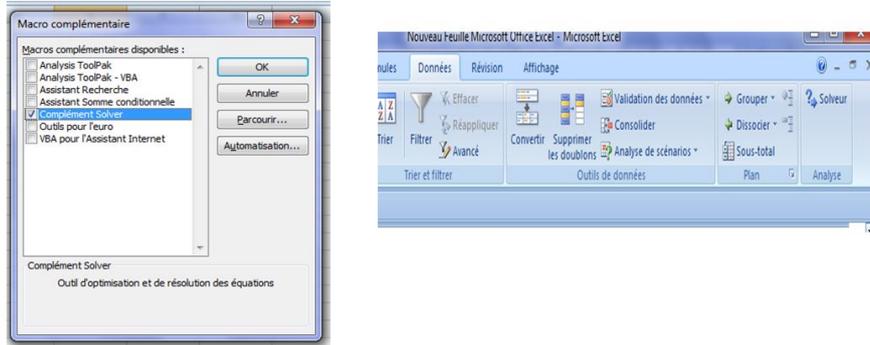
$$a_{11} * X_1 + a_{12} * X_2 + a_{13} * X_3.$$

- La formule de E21 est copiée dans les autres cellules E22, E23, E24.

### Etape 03 : Le solveur d'Excel

Il faut d'abord communiquer au solveur d'Excel la structure du modèle linéaire. Voici comment procéder, cliquer sur le menu Données d'Excel, puis sur l'option Solveur. La boîte de dialogue « Paramètres du solveur » s'ouvre alors (voir la figure (3.4) ci-dessous). Cette boîte permet de fournir au solveur les cinq éléments d'information suivants.

1. La cellule contenant le paramètre à maximiser ou à minimiser : la zone de texte Objectif à définir : la cellule E16 où se trouve la formule définissant la fonction-objectif  $z$ .



2. Le sens de l'optimisation : l'objectif du modèle considéré consistant à minimiser  $z$ , il est nécessaire de modifier la case Max cochée par défaut au Min.
3. La plage des variables de décision : dans la zone Cellules variables : entrer le nom  $x_j$  correspondant à l'adresse de la plage B11 :D11 associée aux variables de décision.
4. Les contraintes et d'intégrité : il faut compléter la zone Contraintes de la façon indiquée ci-après.
5. Le type d'algorithme de résolution.

Il reste à décrire les diverses contraintes du modèle et à choisir l'algorithme de résolution. Commençons par ce dernier. Cliquer sur le menu de la zone Sélectionner. Une résolution : Le solveur offre alors trois choix : GRC non linéaire, Simplex PL et Évolutionnaire. Cliquer sur la seconde option.

Pour saisir les contraintes il faut cliquer sur AJOUTER, La boîte de dialogue affichée devrait ressembler à celle de la figure(3.5). Dans la zone cellule, sélectionner E21. Et dans contrainte sélectionner F21.

Ouvrir le menu déroulant et sélectionner selon la formule de la contrainte. Faire la même chose pour les autres. Déclarer aussi les variables de décisions comme valeur entiers. Ensuite cliquer sur OK. La boîte de dialogue « Paramètres du solveur » devient comme dans la figure 06.

La boîte de dialogue « Paramètres du solveur » devient comme dans la figure (3.6).

| A                                  | B   | C           | D         | E                  | F  |
|------------------------------------|-----|-------------|-----------|--------------------|----|
| <b>Problème de MINIMISATION</b>    |     |             |           |                    |    |
| <b>Dimension</b>                   |     | contraintes | variables |                    |    |
|                                    |     | 4           | 3         |                    |    |
| <b>1/ Déclaration de variables</b> |     |             |           |                    |    |
| <b>les variables</b>               |     |             |           |                    |    |
|                                    | x1  | x2          | x3        |                    |    |
| <b>2/ La fonction objectif</b>     |     |             |           |                    |    |
| <b>coefficients cj</b>             |     |             |           | <b>valeur de z</b> |    |
|                                    | c1  | c2          | c3        | 0                  |    |
| <b>4/ Les contraintes</b>          |     |             |           |                    |    |
|                                    | a11 | a12         | a13       | #VALEUR!           | b1 |
|                                    | a21 | a22         | a23       | #VALEUR!           | b2 |
|                                    | a31 | a32         | a33       | #VALEUR!           | b3 |
|                                    | a41 | a42         | a43       | #VALEUR!           | b4 |

FIGURE 3.1 – Les données numériques du modèle

**Etape 04 : Résolution du problème**

- Cliquer sur le bouton Résoudre. EXCEL tente alors de calculer une solution optimale du modèle linéaire.
- la boîte « Résultats du solveur » de la figure (3.7) s'affichera. Cliquer sur OK. Les solutions sont affichées dans les cellules colorées en marron.

**3.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la programmation linéaire en nombres entiers et nous avons définie la méthode de l'EXCEL SOLVEUR qui permet de trouver un valeur optimale dr PLNE. dans la suite nous avons illustré l'aidée de de bidoki, Baghdadabad, Sukthankar et Turgut 2018 [24].

|    | A | B                               | C  | D  | E                        | F | G |
|----|---|---------------------------------|----|----|--------------------------|---|---|
| 1  |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 2  |   | <b>Problème de MINIMISATION</b> |    |    |                          |   |   |
| 3  |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 4  |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 5  |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 6  |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 7  |   | 1/ Déclaration de variables     |    |    |                          |   |   |
| 8  |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 9  |   | les variables                   |    |    |                          |   |   |
| 10 |   | x1                              | x2 | x3 |                          |   |   |
| 11 |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 12 |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 13 |   | 2/ La fonction objectif         |    |    |                          |   |   |
| 14 |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 15 |   | coefficients cj                 |    |    | valeur de z              |   |   |
| 16 |   | c1                              | c2 | c3 | =B17*B11+C17*C11+D17*D11 |   |   |
| 17 |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 18 |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 19 |   |                                 |    |    |                          |   |   |
| 20 |   |                                 |    |    |                          |   |   |

FIGURE 3.2 – Trouver la valeur Z.

| 4/ Lescontraintes |     |     |                          |    |
|-------------------|-----|-----|--------------------------|----|
| a11               | a12 | a13 | =B21*B11+C21*C11+D21*D11 |    |
| a21               | a22 | a23 |                          | b2 |
| a31               | a32 | a33 |                          | b3 |
| a41               | a42 | a43 |                          | b4 |

| 1/ Lescontraintes |     |     |          |    |
|-------------------|-----|-----|----------|----|
| a11               | a12 | a13 | #VALEUR! | b1 |
| a21               | a22 | a23 | #VALEUR! | b2 |
| a31               | a32 | a33 | #VALEUR! | b3 |
| a41               | a42 | a43 | #VALEUR! | b4 |

FIGURE 3.3 – les contraintes du modèle.

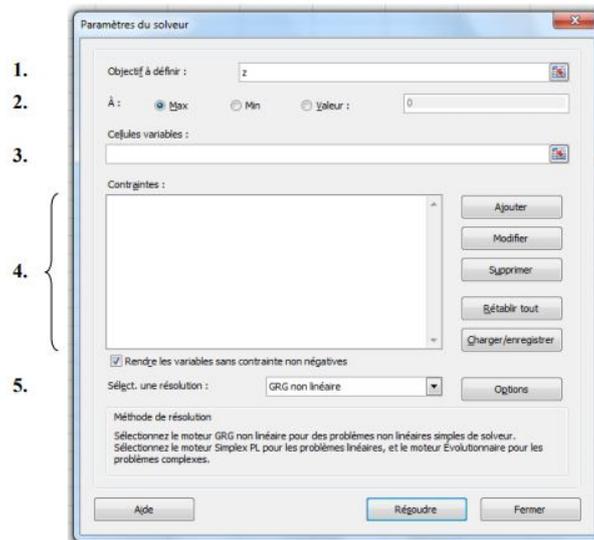


FIGURE 3.4 – La boîte de dialogue «Paramètres du solveur » à l’ouverture.

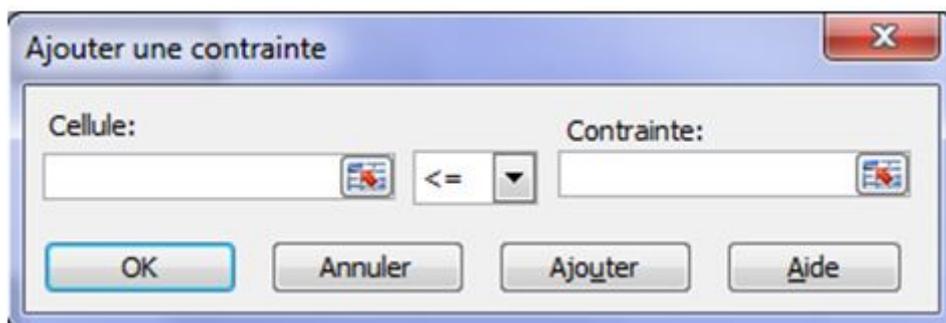


FIGURE 3.5 – La boîte de dialogue « Ajouter une contrainte »

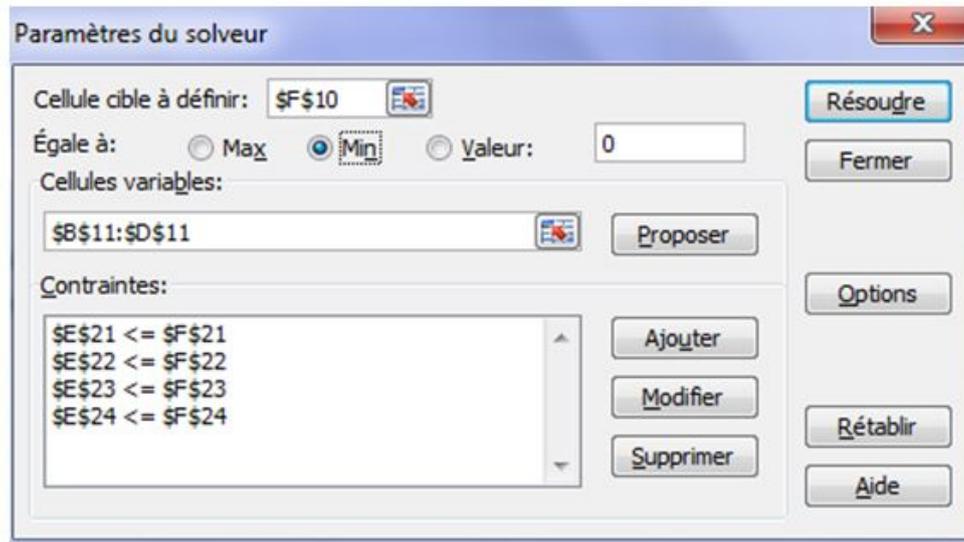


FIGURE 3.6 – La boîte de dialogue « Paramètres du solveur ».

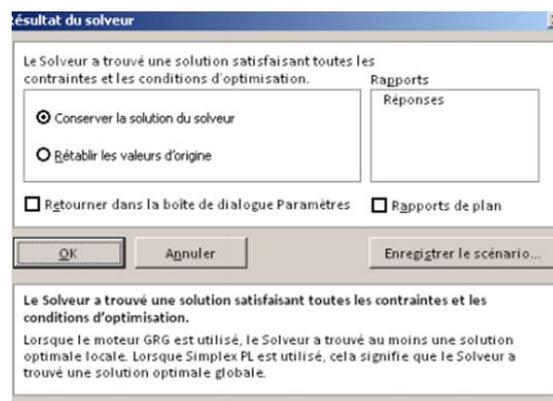


FIGURE 3.7 – boîte de dialogue « Résultat du solveur ».

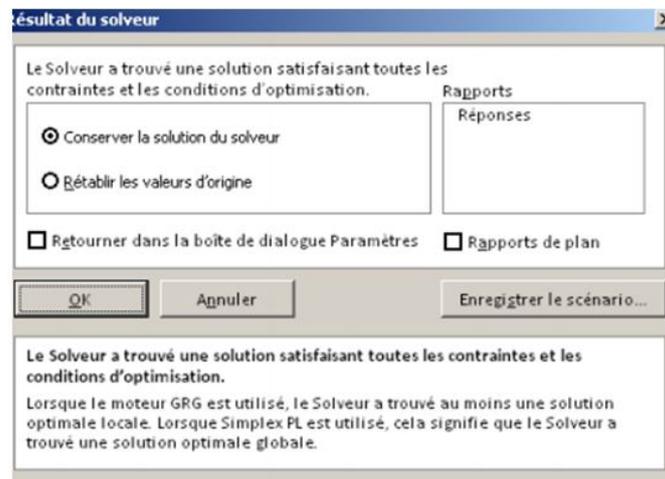


FIGURE 3.8 – La solution optimale obtenue du solveur.

# Modèle mathématique pour la gestion optimal de l'énergie

## 4.1 Introduction

Dans un réseau de capteurs sans fil, Chaque nœud peut surveiller son environnement et réagir si nécessaire, il est capable de détecter, recevoir et d'envoyer des paquets à un nœud spécifique qui collectera les informations à l'aide d'une connexion sans fil. Ces paquets sont envoyés sous forme de messages. Chaque nœud a une capacité énergétique qui doit être utilisée efficacement pour maximiser la durée de vie du réseau, car une défaillance du capteur peut déconnecte complètement le réseau, une fois le nœud épuisé son énergie.

La consommation d'énergie est très importante car les capteurs sont généralement déployés dans des zones inaccessibles. Il est difficile, voire impossible, de remplacer les piles si toute l'énergie a été consommée. Ainsi, le niveau d'énergie du capteur a une grande influence sur la durée de vie du réseau. L'énergie consommée par un capteur est due à la capture, au traitement (la commutation de l'énergie et les fuites) et à la communication (l'énergie de transmission et de réception).

Ainsi le capteur peut être dans trois états à un instant donné : en détection, 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 nœud à un autre jusqu'au nœud gestionnaire (la station de base).

L'un des autres facteurs importants dans le domaine du WNS concernant la collecte de données est la valeur de l'information (VoI). VoI fait référence au profit que l'information apporte à l'utilisateur. La donnée  $d_{i\tau}$  observée par un nœud  $S_i$  à un instant  $\tau$  donné a une valeur d'information  $V_{di\tau}(t)$ , à l'instant  $t \geq \tau$  avec la plus élevée à  $\tau$ .

La fonction  $V_{di\tau}(t)$  est décroissante en  $t$  tel que la VoI d'un bloc de données est la plus élevée lorsque sa valeur est  $V_{di\tau}(t)$ ; Cette valeur de base varie en fonction de l'importance des informations capturées dans le bloc de données.

Notre travail dans ce chapitre s'appuie sur les travaux de bidoki, Baghdadabad, Sukthankar et Turgut 2018 [24] qui ont modélisé le problème de la consommation de l'énergie comme un problème de (la méthode) dont l'objectif était de maximiser la durée de vie du réseau. [24] se concentre sur la maximisation de valeur d'information afin que le VOI au niveau du sink soit maximisé lorsque la donnée prend le plus court chemin, et sur la minimisation de la consommation d'énergie globale en minimisant l'énergie utilisée par chaque nœuds en tenant compte les horaires de sommeil.

## 4.2 Description du problème

Nous considérons un réseau de capteurs constitué d'un ensemble  $V$  de nœuds (capteurs) et d'un nœud central de réception appelé puits ou station de base (voir Fig 4-1). Les nœuds sont statiques et uniformément dispersés dans l'environnement. On suppose qu'ils connaissent leur emplacement soit par un déploiement manuel, soit par l'utilisation de techniques de localisation.

Chaque nœud de capteur est équipé d'antennes semi-duplex omnidirectionnelles. Les capteurs communiquent par des paquets, ces derniers sont envoyés à différents intervalles de temps (slot). Nous supposons qu'il n'y a qu'un seul nœud puits dans ce réseau, et que les nœuds capteurs envoient leurs données vers le, via des routes multi-sauts. L'ensemble des nœuds capables de détecter sont appelés nœuds sources, notés  $S$ . Nous supposons que tout les nœuds sont synchronisés et toutes les liaisons sans fil sont fiables.

Nous utilisons la stratégie d'ordonnancement du sommeil basée sur TDMA qui divise le temps en créneaux égaux. Chaque  $T$  créneaux (appelés aussi slots) forment une trame. La longueur du trame est déterminée en fonction de la caractéristiques du réseau de capteurs. Au cours d'une trame, chaque le nœud source détecte l'environnement pour collecter et envoyer des données une ou plusieurs unités de paquet. Le nombre de ces paquets spécifie le débit de bout en bout d'un nœud source. On note le débit de bout en bout du nœud source  $v_i$  par  $R_i$

- En d'autres termes,  $R_i$  représente le nombre de paquets que le nœud  $V_i$  envoie au puits dans la durée de chaque trame.

- Un réseau de capteurs sans fil est modélisé sous la forme d'un graphe arbitraire  $G=(V,C)\cup\text{Sink}$  qui représente le réseau souhaité où :
  - $S$  : l'ensemble de tous les nœuds sources .
  - $V$  : Est l'ensemble des nœuds (et leurs emplacements)  $V=\{v_1,\dots,v_N\}$ . Nous utilisons les lettres  $i$  et  $j$  pour indiquer les nœuds génériques.
  - $C = c_{ij}$  : l'ensemble des liens relais chaque paire de nœuds.

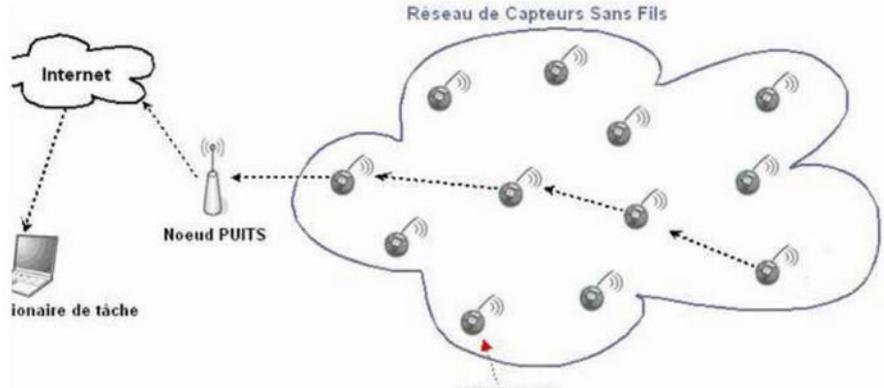


FIGURE 4.1 – Exemple d'un RCSF

- Nous disons que  $i$  et  $j$  sont voisins l'un de l'autre si  $c_{ij}=1$  et Nous supposons que les liens entre les nœuds voisins sont fiables.
- On définit le temps d'opération de la surveillance par  $T$  qu'il est discrétisé et divisé en très petits slots  $t$  dans l'ordonnement de sommeil.
- $d_{it}$  est la donnée détectée par un nœud  $s_i$  au slots  $t$ , tel que  $0 < t < T$ . Dans un intervalle de temps actif, un nœud est soit dans l'état de détection, de réception ou d'envoi. Dans un réseau de capteurs sans fil multi-sauts, une donnée captée par un nœud  $s_i$  est délivrée au puits par un chemin  $P$ . Dans ce travail, nous supposons que l'énergie consommée par un nœud  $s_i$  durant une fenêtre de temps (slot) varie selon son état. On pose alors  $g_{(i,c)}$  l'énergie nécessaire pour envoyer des données pendant un slot de temps  $t$ . On suppose que l'énergie  $g_{(i,r)}$  nécessaire pour recevoir des données dans un slot de temps  $t$  est égale à  $\alpha g_{(i,c)}$  et  $g_{(i,s)}$  l'énergie nécessaire pour détecter des données est égale à  $\beta g_{(i,c)}$ .

## Définition

Nous utilisons les définitions suivantes pour décrire notre formulation.

- **Voisin** : le nœud  $i$  et le nœud  $j$  sont voisins s'ils peuvent communiquer directement.
- **Voisin en une étape** : deux nœuds sont voisins en une étape s'ils peuvent communiquer entre eux via au moins un troisième nœud.
- **La latence totale** : la latence totale des données du nœud pendant  $T$  est donnée en additionnant la latence subie par tous les données du nœud.

- **le retard d'un paquet** : le retard d'un paquet sur un chemin est défini comme le nombre de tranches de temps qu'il faut pour que ce paquet parcoure la route de la source au puits avec le nombre de tranches de temps pendant lesquelles le nœud source doit attendre pour envoyer son paquet.

## Les variables

- $l_{i,j}^t(s)$  : Variable binaire prenant la valeur 1 si un bloc de données capté par le nœud S circule sur le lien entre le nœud  $i$  à  $j$  à l'instant  $t$  ; 0 sinon.
- $b_i^t(s)$  : variable binaire prenant la valeur 1 si le nœud  $i$  reçu un paquet de données du nœud S et l'avoir dans sa mémoire tampon pour l'envoyer à l'instant  $\tau > t$  ; 0 sinon.
- $e_{(i,r)}^t$  : Variable binaire prenant la valeur 1 si le nœud  $i$  reçu des données durant le slot  $t$  ; 0 sinon.
- $e_{(i,c)}^t$  : Variable binaire prenant la valeur 1 si le nœud  $i$  envoi des données durant le slot  $t$  ; 0 sinon.
- $e_{(i,s)}^t$  : est une variable pour le cas où un nœud  $i$  est actif durant le slot  $t$  mais n'envoie pas et ne reçoit pas des données.
- $g_{(i,r)}$  : l'énergie consommée par le nœud  $i$  a l'instant  $t$  pour recevoir des données .
- $g_{(i,c)}$  : l'énergie consommée par le nœud  $i$  a l'instant  $t$  pour envoyer des données.
- $g_{(i,s)}$  : l'énergie consommée par le nœud  $i$  a l'instant  $t$  dans le cas où le nœud  $i$  n'envoie pas et ne reçoit pas des données.

## Les paramètres

- $T$  est la durée des opérations du réseau, divisée en unités de temps numérotées de 0 à  $T-1$ . Lorsqu'un nœud transmet optiquement un bloc de données à un autre nœud ou puits au temps  $t \leq T$ , le récepteur et l'émetteur sont éveillés.

- $\Gamma = \{(i, j, k, p) \mid j \in N_i \wedge k \in N_j \wedge p \in N_k \wedge (i \neq j \neq k \neq p)\}$  est l'ensemble de tous les quads légaux  $(i, j, k, p)$  où chaque nœud est le voisin du précédent et ce sont des nœuds différents.

- $S$  est l'ensemble des nœuds sources (et leurs emplacements).

- $l_{i,p}$  : est la latence subie par les données  $d_{i,p}$  une fois qu'elles ont atteint le puits.

- $N_i$  : est l'ensemble de tous les voisins du nœud  $i$ .

- $B_i$  : étant donné un nœud, renvoie le nombre de nœuds dans son voisinage.

- $A$  : est l'ensemble des nœuds voisins.  $(i, j) \in A$  si le nœud  $i$  et le nœud  $j$  sont voisins.

•  $R_i$  : étant donné un nœud  $i$  renvoie le nombre de paquets qu'il doit envoyer pendant  $T$ .

### 4.2.1 Fonction de l'énergie totale

(1) L'énergie  $E_{(i,s)}$  consommée par le nœud  $i$  dans l'état de détection pendant  $\mathbf{T}$  est donnée comme suit :

$$E_{(i,s)} = \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,s)}^t g_{(i,s)} \quad (4.1)$$

Ainsi que l'énergie totale  $E_s$  consommée dans le réseau en l'état de détection est :

$$E_{(i,s)} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,s)}^t g_{(i,s)} \quad (4.2)$$

(2) L'énergie  $E_{(i,r)}$  consommée par le nœud  $i$  dans l'état de réception pendant  $\mathbf{T}$  est donnée comme suit :

$$E_{(i,r)} = \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,r)}^t g_{(i,r)} \quad (4.3)$$

Ainsi que l'énergie totale  $E_r$  consommée dans le réseau en l'état de réception est :

$$E_{(i,r)} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,r)}^t g_{(i,r)} \quad (4.4)$$

(3) L'énergie  $E_{(i,c)}$  consommée par le nœud  $i$  dans l'état d'envoi pendant  $\mathbf{T}$  est donnée comme suit :

$$E_{(i,c)} = \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,c)}^t g_{(i,c)} \quad (4.5)$$

Ainsi que l'énergie totale  $E_c$  consommée dans le réseau en l'état d'envoi est :

$$E_{(i,c)} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,c)}^t g_{(i,c)} \quad (4.6)$$

Dans ce cas l'énergie globale  $E$  dans le réseau est donnée en additionnant l'énergie consommée par tous les nœuds dans les trois états. Supposons que l'énergie consommée par slot pour chaque état est la même pour tous les nœuds tel que  $g_{i,c}=g_c$ ,  $g_{i,r}=g_r$  et  $g_{i,s}=g_s$  alors :

$$E = E_s + E_r + E_c \quad (4.7)$$

En remplaçant par (4.2), (4.4) et (4.6) nous trouvons :

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,s)}^t g_{(i,s)} + \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,r)}^t g_{(i,r)} + \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,c)}^t g_{(i,c)} \quad (4.8)$$

Puisque :

$$\left\{ \begin{array}{l} g_r = \alpha g_c \\ \wedge \\ g_s = \beta g_c \end{array} \right. \quad \text{alors}$$

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,s)}^t \beta g_c + \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,r)}^t \alpha g_c + \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,c)}^t g_c$$

$$E = \beta \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,s)}^t g_c + \alpha \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,r)}^t g_c + \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} e_{(i,c)}^t g_c$$

$$E = (1 + \alpha + \beta) \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{T-1} (e_{(i,s)}^t + e_{(i,r)}^t + e_{(i,c)}^t) g_c \quad (4.9)$$

### 4.2.2 Fonction de latence totale

Le retard subi par un flux issu de la source  $s$ , noté, est considéré comme équivalent au nombre total d'intervalles de temps nécessaires pour que ses paquets atteignent le puits.

$$L_s = \sum_s \sum_{i \in c_{i,sink=1}} \sum_t t * l_{i,sink}^t(s) \quad (4.10)$$

En supposant  $L$  est la latence totale des données du nœud pendant  $T$ , tel que  $L$  est défini comme la somme des latence subis par tous les flux dans le réseau. La latence totale peut être calculée comme suit :

$$L = \sum_s L_s, \forall s \in S \quad (4.11)$$

En remplaçant par 4.10 dans 4.11 nous trouvons

$$L_s = \sum_s \sum_{i \in c_{i,sink=1}} \sum_{t=0}^{T-1} t * l_{i,sink}^t(s) \quad (4.12)$$

### 4.2.3 Fonction objectif

Étant donné  $|S|$  nœuds et leurs emplacements, déterminer les chemins et l'horaire de sommeil de chaque nœud afin que la latence globale ainsi que l'énergie consommée par les nœuds du réseau est minimisée. Le modèle minimisant conjointement  $E$  et  $L$  est préféré. En conséquence, nous combinons les deux fonctions objectives précédentes comme on peut le voir ci-dessous :

$$\text{minimize } \vartheta = \frac{E - E^*}{E^*} + \frac{L - L^*}{L^*} \quad (4.13)$$

La fonction objective maximise la valeur de l'information en minimisant la latence que les données détectées par les nœuds du réseau subissent lorsqu'elles atteignent le puits. Il minimise également conjointement énergie consommée par les nœuds pour détecter les données de l'environnement et le routage ou les données reçues de leurs voisins vers le puits au temps  $T$ . Ce modèle peut être utilisé car il considère la somme de les deux objectifs et également mettre à l'échelle chacun pour éviter de dominer l'un objectif.

Nous considérons et comme deux constantes, le modèle peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} \text{minimize } \vartheta = & \frac{(1 + \alpha + \beta) \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (e_{(i,s)}^t + e_{(i,r)}^t + e_{(i,c)}^t) g_{(c)} - E^*}{E^*} + \\ & \frac{\sum_s \sum_{c_i, \text{sink}=1} \sum_t t * l_{i, \text{sink}}^t(s) - L^*}{L^*} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$E^*$  est la valeur optimale de la fonction objectif liée à l'énergie et  $L^*$  est la valeur optimale de la fonction objectif liée au latence, ces deux valeurs sont, à leur tour, obtenues à partir de les fonctions données pour E et L dans 4.9 et 4.12 respectivement.

#### 4.2.4 Les contraintes du problème

$$e_{(i,s)}^t + e_{(i,r)}^t + e_{(i,c)}^t \leq 1 \quad , \forall v_i \in V, \forall t \in \mathbf{T} \quad (4.15)$$

La première contrainte garantit qu'un nœud dans le RCSF reçoit, détecte ou transmet des données dans le slot t, mais pas les 3 en même temps.

$$e_{(i,c)}^t = \sum_S \sum_{j \in N_i} l_{i,j}^{t+1}(s) \quad , \forall i \in v, \forall t \in T. \quad (4.16)$$

$$e_{(i,r)}^t = \sum_S \sum_{j|i \in N_i} l_{i,j}^{t-1}(s) \quad , \forall i \in v, \forall t > 0. \quad (4.17)$$

$$e_{(i,s)}^t = 0, \forall v_i \in V - S. \quad , \forall i \in v, \forall t \in T. \quad (4.18)$$

ces deux contraintes représentent la liaison entre les  $e_{i,c}^t$  et  $l_{i,j}^t$ .

$$e_{(i,r)}^0 = 0 \quad , \forall i \in v, \forall i \in V. \quad (4.19)$$

$$\sum_s \sum_{i, \text{sink}=1} \sum_t l_{i, \text{sink}}^t(s) = \sum_i R_i. \quad (4.20)$$

$$b_i^0(s) + \sum_{j \in N_i} l_{i,j}^1(s) = R_i, \quad \forall v_i \in V, \forall s \in S. \quad (4.21)$$

La deuxième contrainte garantit que les données mises en mémoire tampon ou prêtes à être envoyées dans le prochain intervalle de temps pour chaque nœud sont égales au nombre de paquets que le nœud doit envoyer pendant  $T$ . Étant donné que la durée de vie du réseau peut être divisée en plusieurs périodes  $T$ , sans perte de manière générale, nous résolvons le problème de recherche de chemin et d'ordonnancement temporel pour une période, on peut donc supposer que tous les paquets qui doivent être envoyés par chaque nœud au puits par  $T$  sont prêts à être envoyés ou à être mis en mémoire tampon au début de chaque période. Comme, au début de la période  $T$ , le nœud n'a pas encore reçu de données des autres nœuds, sa contrainte est différente avec les autres intervalles de temps et s'écrit sous la forme de l'équation (4.21).

$$b_i^t(s) + \sum_{j \in N_i} l_{i,j}^{t+1}(s) = b_i^{t-1}(s) + \sum_{j \in N_i} l_{j,i}^t(s), \quad \forall s \in S, \forall v_i \in V, t \in T. \quad (4.22)$$

La contrainte (4.22) garantit que les nœuds qui ont reçu les paquets les envoient et la connectivité est maintenue jusqu'à ce que le puits reçoive les paquets. Il convient de mentionner qu'après le premier intervalle de temps dans lequel certains des nœuds ont envoyé leurs données détectées, des nœuds relais peuvent avoir reçu un ou plusieurs paquets d'autres nœuds. En conséquence, ils pourraient avoir des paquets en plus de ceux détectés par eux-mêmes. Ils peuvent soit mettre en mémoire tampon les données disponibles pour les envoyer plus tard, soit les transmettre immédiatement. En effet, la contrainte (4.22) impose l'échange de paquets de chaque nœud source  $s$ , via des nœuds intermédiaires et à des intervalles non nuls. Il s'applique à tous les nœuds à l'exception du puits auquel se termine chaque flux.

$$\sum_{s \in S} \left( \sum_{j \in N_i} l_{i,j}^t(s) + \sum_{j \in N_i} l_{j,i}^t(s) \right) \leq 1, \quad \forall i \in V \wedge \forall t \in T. \quad (4.23)$$

$$B_j * \sum_{s \in S} l_{i,j}^t(s) + \sum_{(i,j,k,p) \in \Gamma(i)} \sum_{s \in S} l_{k,p}^t(s) \leq B_j, \quad \forall i \in s, t \in T. \quad (4.24)$$

$$B_j * \sum_{j \in N_i} \sum_{s \in S} l_{i,j}^t(s) + \sum_{(i,j,k) \in A(i)} \sum_{s \in S} l_{k,j}^t(s) \leq B_j, \quad \forall i \in s, t \in T. \quad (4.25)$$

Les contraintes (4.23)-(4.25) s'occupent de l'interférence. Les performances d'un WSN sont fortement affectées par les interférences qui peuvent entraîner des pertes de paquets et leur retransmission, ce qui augmente implicitement la consommation d'énergie du nœud. Par conséquent, une fois qu'un nœud communique avec l'un de ses voisins, tous les autres nœuds de sa zone de couverture radio doivent rester silencieux. De plus, les antennes semi-duplex utilisées dans les nœuds de capteurs sans fil ne peuvent pas envoyer et recevoir des données simultanément.

### 4.3 Application numérique

Cette partie consacré à la réalisation et la mise œuvre de notre application de maximiser la durée de vie de RCSF. Le problème posé était le suivant : trouver l'énergie optimale et la latence optimale dans un RCSF avec des nœuds statique. Nous avons voulu insister dans ce qui suit sur les aspects concrets, nous donnons donc deux exemples pour illustrer le fonctionnement d'un réseau de capteurs lesquels on donne les 02 programmes linéaires associés.

Considérons un réseau de capteurs sans fil avec 03 nœuds (2 nœuds et un nœuds relais) + sink ;  $V = \{s_1, s_2, s_3\}$  et  $S = \{s_1, s_2\}$ . Le temps total de réseau est divisés en 4 slots.

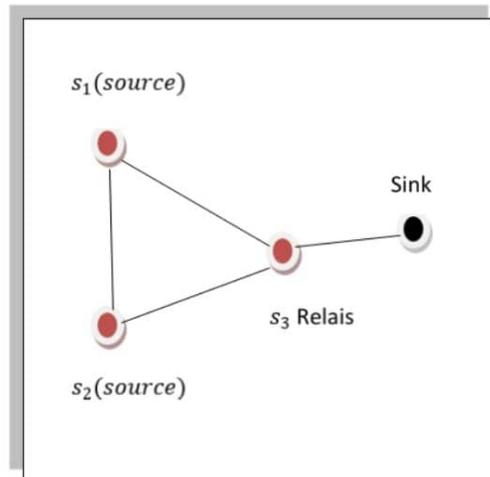


FIGURE 4.2 – Exemple d'un RCSF avec 3 nœuds sources sink.

- $N_{s_1} = \{s_2, s_3\}$  : L'ensemble des voisinages de  $s_1$ .
- $N_{s_2} = \{s_1, s_3\}$  : L'ensemble des voisinages de  $s_2$ .

—  $N_{s_3} = \{s_1, s_2, \text{sink}\}$  : L'ensemble des voisinages de  $s_3$ .

### 4.3.1 Énergie totale

A l'aide de 4.9 on a :

$$E = (1 + \alpha + \beta) g(c) \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^3 (e_{(i,s)}^t + e_{(i,r)}^t + e_{(i,c)}^t) \quad (4.26)$$

Alors on simplifie E en :

$$\begin{aligned} E = (1 + \alpha + \beta) g(c) [ & e_{(1,s)}^0 + e_{(1,r)}^0 + e_{(1,c)}^0 + e_{(1,s)}^1 + e_{(1,r)}^1 + e_{(1,c)}^1 \\ & + e_{(1,s)}^2 + e_{(1,r)}^2 + e_{(1,c)}^2 + e_{(1,s)}^3 + e_{(1,r)}^3 + e_{(1,c)}^3 + e_{(2,s)}^0 + e_{(2,r)}^0 + e_{(2,c)}^0 \\ & + e_{(2,s)}^1 + e_{(2,r)}^1 + e_{(2,c)}^1 + e_{(2,s)}^2 + e_{(2,r)}^2 + e_{(2,c)}^2 + e_{(2,s)}^3 + e_{(2,r)}^3 + e_{(2,c)}^3 \\ & + e_{(3,s)}^0 + e_{(3,r)}^0 + e_{(3,c)}^0 + e_{(3,s)}^1 + e_{(3,r)}^1 + e_{(3,c)}^1 + e_{(3,s)}^2 + e_{(3,r)}^2 + e_{(3,c)}^2 \\ & \quad \quad \quad + e_{(3,s)}^3 + e_{(3,r)}^3 + e_{(3,c)}^3] \end{aligned}$$

### 4.3.2 Latence totale

A l'aide de 4.12

$$L = \sum_s \sum_{c_i, \text{sink}=1} \sum_t t * l_{i, \text{sink}}^t(s) \quad (4.27)$$

Dans la fonction suivante on va donnée la latence de nœud source  $s_1$ . Puisque  $s_3$  est le seule nœud voisin au sink alors  $c_{s_3, \text{sink}}=1$ .

$$L_{s_1} = \sum_t^3 t * l_{s_3, \text{sink}}^t(s_1)$$

$$L_{s_1} = 1 * l_{s_3, \text{sink}}^1(s_1) + 2 * l_{s_3, \text{sink}}^2(s_1) + 3 * l_{s_3, \text{sink}}^3(s_1)$$

Dans la fonction suivante on va donnée la latence de nœud source  $s_2$ . Puisque  $s_3$  est le seule nœud voisin au sink alors  $c_{s_3, \text{sink}}=1$ .

$$L_{s_2} = \sum_t^3 t * l_{s_3, \text{sink}}^t(s_2)$$

$$L_{s_2} = 1 * l_{s_3, \text{sink}}^1(s_2) + 2 * l_{s_3, \text{sink}}^2(s_2) + 3 * l_{s_3, \text{sink}}^3(s_2)$$

La fonction de latence est donnée come suit :

$$L = 1 * l_{s_3, \text{sink}}^1(s_1) + 2 * l_{s_3, \text{sink}}^2(s_1) + 3 * l_{s_3, \text{sink}}^3(s_1) + 1 * l_{s_3, \text{sink}}^1(s_2) + 2 * l_{s_3, \text{sink}}^2(s_2) + 3 * l_{s_3, \text{sink}}^3(s_2)$$

### 4.3.3 La fonction objectif

A l'aide de 4.14 on a :

$$\text{minimize } \ni = \frac{(1 + \alpha + \beta) g_{(c)}(s) \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^3 (e_{(i,s)}^t + e_{(i,r)}^t + e_{(i,c)}^t) - E^*}{E^*} +$$

$$\frac{\sum_s \sum_{c_i, \text{sink}=1} \sum_{t=1}^3 t * l_{i, \text{sink}}^t(s_i) - L^*}{L^*}$$

### 4.3.4 Contraintes

En appliquant les données de l'exemple sur 4.15, nous trouvons :

$$e_{(1,s)}^0 + e_{(1,r)}^0 + e_{(1,c)}^0 \leq 1$$

$$e_{(1,s)}^1 + e_{(1,r)}^1 + e_{(1,c)}^1 \leq 1$$

$$e_{(1,s)}^2 + e_{(1,r)}^2 + e_{(1,c)}^2 \leq 1$$

$$e_{(1,s)}^3 + e_{(1,r)}^3 + e_{(1,c)}^3 \leq 1$$

$$e_{(2,s)}^0 + e_{(2,r)}^0 + e_{(2,c)}^0 \leq 1$$

$$e_{(2,s)}^1 + e_{(2,r)}^1 + e_{(2,c)}^1 \leq 1$$

$$e_{(2,s)}^2 + e_{(2,r)}^2 + e_{(2,c)}^2 \leq 1$$

$$e_{(2,s)}^3 + e_{(2,r)}^3 + e_{(2,c)}^3 \leq 1$$

$$e_{(3,s)}^0 + e_{(3,r)}^0 + e_{(3,c)}^0 \leq 1$$

$$e_{(3,s)}^1 + e_{(3,r)}^1 + e_{(3,c)}^1 \leq 1$$

$$e_{(3,s)}^2 + e_{(3,r)}^2 + e_{(3,c)}^2 \leq 1$$

$$e_{(3,s)}^3 + e_{(3,r)}^3 + e_{(3,c)}^3 \leq 1$$

En appliquant les données de l'exemple sur 4.21, nous trouvons :  
pour le nœud source  $s_1$  :

$$b_{s_1}^0(s_1) + l_{s_1,s_2}^1(s_1) + l_{s_1,s_3}^1(s_1) = R_{s_1}$$

$$b_{s_2}^0(s_1) + l_{s_2,s_1}^1(s_1) + l_{s_2,s_3}^1(s_1) = R_{s_2}$$

$$b_{s_3}^0(s_1) + l_{s_3,s_1}^1(s_1) + l_{s_3,s_2}^1(s_1) + l_{s_3,sink}^1(s_1) = R_{s_3}$$

pour le nœud source  $s_2$  :

$$b_{s_1}^0(s_2) + l_{s_1,s_2}^1(s_2) + l_{s_1,s_3}^1(s_2) = R_{s_1}$$

$$b_{s_2}^0(s_2) + l_{s_3,s_1}^1(s_2) + l_{s_2,s_3}^1(s_2) = R_{s_2}$$

$$b_{s_3}^0(s_2) + l_{s_3,s_1}^1(s_2) + l_{s_3,s_2}^1(s_2) + l_{s_3,sink}^1(s_2) = R_{s_3}$$

sur 4.22 nous trouvons :

pour le nœud source  $s_1$ ,  $t=1$  :

$$b_{s_1}^1(s_1) + l_{s_1,s_2}^2(s_1) + l_{s_1,s_3}^2(s_1) = b_{s_1}^0(s_1) + l_{s_2,s_1}^1(s_1) + l_{s_3,s_1}^1(s_1).$$

$$b_{s_2}^1(s_1) + l_{s_2,s_1}^2(s_1) + l_{s_2,s_3}^2(s_1) = b_{s_2}^0(s_1) + l_{s_1,s_2}^1(s_1) + l_{s_3,s_2}^1(s_1).$$

$$b_{s_3}^1(s_1) + l_{s_3,s_1}^2(s_1) + l_{s_3,s_2}^2(s_1) + l_{s_3,sink}^2(s_1) = b_{s_3}^0(s_1) + l_{s_3,s_1}^1(s_1) + l_{s_2,s_3}^1(s_1) + l_{sink,s_3}^1(s_1).$$

pour le nœud source  $s_2$ ,  $t = 1$  :

$$b_{s_1}^1(s_2) + l_{s_1,s_2}^2(s_2) + l_{s_1,s_3}^2(s_2) = b_{s_1}^0(s_2) + l_{s_2,s_1}^1(s_2) + l_{s_3,s_1}^1(s_2).$$

$$b_{s_2}^1(s_2) + l_{s_2,s_1}^2(s_2) + l_{s_2,s_3}^2(s_2) = b_{s_2}^0(s_2) + l_{s_2,s_2}^1(s_1) + l_{s_3,s_2}^1(s_2).$$

$$b_{s_3}^1(s_2) + l_{s_3,s_1}^2(s_2) + l_{s_3,s_2}^2(s_2) + l_{s_3,sink}^2(s_2) = b_{s_3}^0(s_2) + l_{s_1,s_3}^1(s_2) + l_{s_2,s_3}^1(s_2) + l_{sink,s_3}^1(s_2).$$

pour le nœud  $s_1$ ,  $t=2$  :

$$b_{s_1}^2(s_1) + l_{s_1,s_2}^3(s_1) + l_{s_1,s_3}^3(s_1) = b_{s_1}^1(s_1) + l_{s_2,s_1}^2(s_1) + l_{s_3,s_1}^2(s_1).$$

$$b_{s_2}^2(s_1) + l_{s_2,s_1}^3(s_1) + l_{s_2,s_3}^3(s_1) = b_{s_2}^1(s_1) + l_{s_1,s_2}^2(s_1) + l_{s_3,s_2}^2(s_1).$$

$$b_{s_3}^2(s_1) + l_{s_3,s_1}^3(s_1) + l_{s_3,s_2}^3(s_1) + l_{s_3,sink}^3(s_1) = b_{s_3}^1(s_1) + l_{s_1,s_3}^2(s_1) + l_{s_2,s_3}^2(s_1) + l_{sink,s_3}^2(s_1).$$

pour le nœud  $s_2$ ,  $t=2$  :

$$b_{s_1}^2(s_2) + l_{s_1,s_2}^3(s_2) + l_{s_1,s_3}^3(s_2) = b_{s_1}^1(s_2) + l_{s_2,s_1}^2(s_2) + l_{s_3,s_1}^2(s_2).$$

$$b_{s_2}^2(s_2) + l_{s_2,s_1}^3(s_2) + l_{s_2,s_3}^3(s_2) = b_{s_2}^1(s_2) + l_{s_1,s_2}^2(s_2) + l_{s_3,s_2}^2(s_2).$$

$$b_{s_3}^2(s_2) + l_{s_3,s_1}^3(s_1) + l_{s_3,s_2}^3(s_2) + l_{s_3,sink}^3(s_2) = b_{s_3}^1(s_2) + l_{s_1,s_3}^2(s_2) + l_{s_2,s_3}^2(s_2) + l_{sink,s_3}^2(s_2).$$

pour le nœud  $s_1$ ,  $t=3$  :

$$b_{s_1}^3(s_1) = b_{s_1}^2(s_1) + l_{s_1,s_2}^3(s_1) + l_{s_1,s_3}^3(s_1).$$

$$b_{s_2}^3(s_1) = b_{s_2}^2(s_1) + l_{s_2,s_1}^3(s_1) + l_{s_2,s_3}^3(s_1).$$

$$b_{s_3}^3(s_1) = b_{s_3}^2(s_1) + l_{s_3,s_1}^3(s_1) + l_{s_3,s_2}^3(s_1) + l_{s_3,sink}^3(s_1).$$

pour le nœud  $s_2$ ,  $t=3$  :

$$b_{s_1}^3(s_2) = b_{s_1}^2(s_2) + l_{s_1,s_2}^3(s_2) + l_{s_1,s_3}^3(s_2).$$

$$b_{s_2}^3(s_2) = b_{s_2}^2(s_2) + l_{s_2,s_1}^3(s_2) + l_{s_2,s_3}^3(s_2).$$

$$b_{s_3}^3(s_2) = b_{s_3}^2(s_2) + l_{s_3,s_1}^3(s_2) + l_{s_3,s_2}^3(s_2) + l_{s_3,sink}^3(s_2).$$

sur le 4.23

pour le nœud source  $s_1$ ,  $t=1$  :

$$l_{s_1,s_2}^1(s_1) + l_{s_1,s_3}^1(s_1) + l_{s_2,s_1}^1(s_1) + l_{s_3,s_1}^1(s_1) \leq 1$$

$$l_{s_2,s_1}^1(s_1) + l_{s_2,s_3}^1(s_1) + l_{s_1,s_2}^1(s_1) + l_{s_3,s_2}^1(s_1) \leq 1$$

$$l_{s_3,s_1}^1(s_1) + l_{s_3,s_2}^1(s_1) + l_{s_3,sink}^1(s_1) + l_{s_1,s_3}^1(s_1) + l_{s_2,s_3}^1(s_1) + l_{sink,s_3}^1(s_1) \leq 1$$

pour le nœud source  $s_2$ ,  $t=1$  :

$$l_{s_1,s_2}^1(s_2) + l_{s_1,s_3}^1(s_2) + l_{s_2,s_1}^1(s_2) + l_{s_3,s_1}^1(s_2) \leq 1$$

$$l_{s_2,s_1}^1(s_2) + l_{s_2,s_3}^1(s_2) + l_{s_1,s_2}^1(s_2) + l_{s_3,s_2}^1(s_2) \leq 1$$

$$l_{s_3,s_1}^1(s_2) + l_{s_3,s_2}^1(s_2) + l_{s_3,sink}^1(s_2) + l_{s_1,s_3}^1(s_2) + l_{s_2,s_3}^1(s_2) + l_{sink,s_3}^1(s_2) \leq 1$$

pour le nœud source  $s_1$ ,  $t=2$  :

$$l_{s_1,s_2}^2(s_1) + l_{s_1,s_3}^2(s_1) + l_{s_2,s_1}^2(s_1) + l_{s_3,s_1}^2(s_1) \leq 1$$

$$l_{s_2,s_1}^2(s_1) + l_{s_2,s_3}^2(s_1) + l_{s_1,s_2}^2(s_1) + l_{s_3,s_2}^2(s_1) \leq 1$$

$$l_{s_3,s_1}^2(s_1) + l_{s_3,s_2}^2(s_1) + l_{s_3,sink}^2(s_1) + l_{s_1,s_3}^2(s_1) + l_{s_2,s_3}^2(s_1) + l_{sink,s_3}^2(s_1) \leq 1$$

pour le nœud source  $s_2$ ,  $t=2$  :

$$l_{s_1,s_2}^2(s_2) + l_{s_1,s_3}^2(s_2) + l_{s_2,s_1}^2(s_2) + l_{s_3,s_1}^2(s_2) \leq 1$$

$$l_{s_2,s_1}^2(s_2) + l_{s_2,s_3}^2(s_2) + l_{s_1,s_2}^2(s_2) + l_{s_3,s_2}^2(s_2) \leq 1$$

$$l_{s_3,s_1}^2(s_2) + l_{s_3,s_2}^2(s_2) + l_{s_3,sink}^2(s_2) + l_{s_1,s_3}^2(s_2) + l_{s_2,s_3}^2(s_2) + l_{sink,s_3}^2(s_2) \leq 1$$

pour le nœud source  $s_1$ ,  $t=3$  :

$$l_{s_1,s_2}^3(s_1) + l_{s_1,s_3}^3(s_1) + l_{s_2,s_1}^3(s_1) + l_{s_3,s_1}^3(s_1) \leq 1$$

$$l_{s_2,s_1}^3(s_1) + l_{s_2,s_3}^3(s_1) + l_{s_1,s_2}^3(s_1) + l_{s_3,s_2}^3(s_1) \leq 1$$

$$l_{s_3,s_1}^3(s_1) + l_{s_3,s_2}^3(s_1) + l_{s_3,sink}^3(s_1) + l_{s_1,s_3}^3(s_1) + l_{s_2,s_3}^3(s_1) + l_{sink,s_3}^3(s_1) \leq 1$$

pour le nœud source  $s_2$ ,  $t=3$  :

$$l_{s_1,s_2}^3(s_2) + l_{s_1,s_3}^3(s_2) + l_{s_2,s_1}^3(s_2) + l_{s_3,s_1}^3(s_2) \leq 1$$

$$l_{s_2,s_1}^3(s_2) + l_{s_2,s_3}^3(s_2) + l_{s_1,s_2}^3(s_2) + l_{s_3,s_2}^3(s_2) \leq 1$$

$$l_{s_3,s_1}^3(s_2) + l_{s_3,s_2}^3(s_2) + l_{s_3,sink}^3(s_2) + l_{s_1,s_3}^3(s_2) + l_{s_2,s_3}^3(s_2) + l_{sink,s_3}^3(s_2) \leq 1$$

avec la contrainte 4.24 devient :

pour le nœud source  $s_1$ ,  $t=1$  :

$$B_j * l_{s_1,s_2}^1(s_1) + l_{s_3,sink}^1(s_1) \leq B_j$$

pour le nœud  $s_2$ ,  $t=1$  :

$$B_j * l_{s_1,s_2}^1(s_2) + l_{s_3,sink}^1(s_2) \leq B_j$$

pour le nœud source  $s_1$ ,  $t=2$  :

$$B_j * l_{s_1,s_2}^2(s_1) + l_{s_3,sink}^2(s_1) \leq B_j$$

pour le nœud source  $s_2$ ,  $t=2$  :

$$B_j * l_{s_1,s_2}^2(s_2) + l_{s_3,sink}^2(s_2) \leq B_j$$

pour le nœud source  $s_1$ ,  $t=3$  :

$$B_j * l_{s_1,s_2}^3(s_1) + l_{s_3,sink}^3(s_1) \leq B_j$$

pour le nœud source  $s_2$ ,  $t=3$  :

$$B_j * l_{s_1, s_2}^3(s_2) + l_{s_3, sink}^3(s_2) \leq B_j$$

pour la contrainte 4.25

$i=s_1$ , pour le voisin  $j=s_2$  et  $t=1$  :

$$B_2 * l_{s_1, s_2}^1(s_1) + l_{s_1, s_2}^1(s_2) + l_{s_3, s_2}^1(s_1) + l_{s_3, s_2}^1(s_2) \leq B_2$$

$i=s_1$ , pour le voisin  $j=s_2$  et  $t=2$  :

$$B_2 * l_{s_1, s_2}^2(s_1) + l_{s_1, s_2}^2(s_2) + l_{s_3, s_2}^2(s_1) + l_{s_3, s_2}^2(s_2) \leq B_2$$

$i=s_1$ , pour le voisin  $j=s_2$  et  $t=3$  :

$$B_2 * l_{s_1, s_2}^3(s_1) + l_{s_1, s_2}^3(s_2) + l_{s_3, s_2}^3(s_1) + l_{s_3, s_2}^3(s_2) \leq B_2$$

pour  $i=s_1$ , pour le voisin  $j=s_3$  et  $t=1$  :

$$B_3 * l_{s_1, s_3}^1(s_1) + l_{s_1, s_3}^1(s_2) + l_{s_2, s_3}^1(s_1) + l_{s_2, s_3}^1(s_2) \leq B_3$$

pour  $i=s_1$ , pour le voisin  $j=s_3$  et  $t=2$  :

$$B_3 * l_{s_1, s_3}^2(s_1) + l_{s_1, s_3}^2(s_2) + l_{s_2, s_3}^2(s_1) + l_{s_2, s_3}^2(s_2) \leq B_3$$

pour  $i=s_1$ , pour le voisin  $j=s_3$  et  $t=3$  :

$$B_3 * l_{s_1, s_3}^3(s_1) + l_{s_1, s_3}^3(s_2) + l_{s_2, s_3}^3(s_1) + l_{s_2, s_3}^3(s_2) \leq B_3$$

pour  $i=s_2$ , pour le voisin  $j=s_1$  et  $t=1$  :

$$B_1 * l_{s_2, s_1}^1(s_1) + l_{s_2, s_1}^1(s_2) + l_{s_3, s_1}^1(s_1) + l_{s_3, s_1}^1(s_2) \leq B_1$$

pour  $i=s_2$ , pour le voisin  $j=s_1$  et  $t=2$  :

$$B_1 * l_{s_2, s_1}^2(s_1) + l_{s_2, s_1}^2(s_2) + l_{s_3, s_1}^2(s_1) + l_{s_3, s_1}^2(s_2) \leq B_1$$

pour  $i=s_2$ , pour le voisin  $j=s_1$  et  $t=3$  :

$$B_1 * l_{s_2, s_1}^3(s_1) + l_{s_2, s_1}^3(s_2) + l_{s_3, s_1}^3(s_1) + l_{s_3, s_1}^3(s_2) \leq B_1$$

pour  $i=s_2$ , pour le voisin  $j=s_3$  et  $t=1$  :

$$B_3 * l_{s_2, s_3}^1(s_2) + l_{s_2, s_3}^1(s_1) + l_{s_3, s_1}^1(s_2) + l_{s_1, s_3}^1(s_1) \leq B_3$$

pour  $i=s_2$ , pour le voisin  $j=s_3$  et  $t=2$  :

$$B_3 * l_{s_2, s_3}^2(s_2) + l_{s_2, s_3}^2(s_1) + l_{s_3, s_1}^2(s_2) + l_{s_1, s_3}^2(s_1) \leq B_3$$

pour  $i=s_2$ , pour le voisin  $j=s_3$  et  $t=3$  :

$$B_3 * l_{s_2, s_3}^3(s_2) + l_{s_2, s_3}^3(s_1) + l_{s_3, s_1}^3(s_2) + l_{s_1, s_3}^3(s_1) \leq B_3$$

dans un zone de captage au but de suivis l'augmentation de la température  
 Nous considérons un réseau de 3 nœuds avec un façon aléatoire ces nœuds sont  
 statique Nous domons les paramètres suivant :

$$(g_c=1 / \alpha= 1/2, \beta=3/2)$$

$R_2=R_1=1$  le nombre de paquet des données avec  $R_3 = 0$  en suivant les données de  
 l'exemple 01 nous résoudreons le programme obtenue :

|                                 | A | B | C        | D        |
|---------------------------------|---|---|----------|----------|
| <b>Problème de MINIMISATION</b> |   |   |          |          |
| Dimension                       |   |   | <i>m</i> | <i>n</i> |
|                                 |   |   | 65       | 102      |

| 1/ Déclaration de variables |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $e_{1,c}^1$                 | $e_{1,r}^1$      | $e_{1,s}^1$      | $e_{1,c}^2$      | $e_{1,r}^2$      | $e_{1,s}^2$      | $e_{1,c}^3$      | $e_{1,r}^3$      | $e_{1,s}^3$      | $e_{2,c}^1$       | $e_{2,r}^1$       | $e_{2,s}^1$       |
| 0                           | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 |
| $e_{2,c}^2$                 | $e_{2,r}^2$      | $e_{2,s}^2$      | $e_{3,c}^3$      | $e_{3,r}^3$      | $e_{3,s}^3$      | $e_{3,c}^1$      | $e_{3,r}^1$      | $e_{3,s}^1$      | $e_{3,c}^2$       | $e_{3,r}^2$       | $e_{3,s}^2$       |
| 1                           | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 1                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 1                 |
| $b_{3,c}^3$                 | $b_{3,r}^3$      | $b_{3,s}^3$      | $b_{s_1}^0$      | $b_{s_2}^0$      | $b_{s_3}^0$      | $b_{s_1}^1$      | $b_{s_2}^1$      | $b_{s_3}^1$      | $b_{s_1}^2$       | $b_{s_2}^2$       | $b_{s_3}^2$       |
| 1                           | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 |
| $l_{s_1}^1$                 | $b_{s_1}^2$      | $b_{s_2}^2$      | $l_{s_1,s_2}^2$  | $l_{s_1,s_3}^2$  | $l_{s_2,s_3}^2$  | $l_{s_1,s_3}^1$  | $l_{s_1,s_2}^1$  | $l_{s_2,s_3}^1$  | $l_{s_1,s_2}^3$   | $l_{s_1,s_3}^3$   | $l_{s_2,s_3}^3$   |
| 1                           | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 |
| $l_{s_2,s_3}^1$             | $l_{s_2,s_3}^2$  | $l_{s_2,s_3}^3$  | $l_{s_2,s_1}^1$  | $l_{s_2,s_1}^2$  | $l_{s_2,s_1}^3$  | $l_{s_3,s_2}^1$  | $l_{s_3,s_2}^2$  | $l_{s_3,s_2}^3$  | $l_{s_3,sink}^1$  | $l_{s_3,sink}^2$  | $l_{s_3,sink}^3$  |
| 0                           | 0                | 0                | 1                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 1                 |
| $b_{1,c}^0$                 | $e_{1,r}^0$      | $e_{1,s}^0$      | $b_{s_1}^2$      | $b_{s_2}^2$      | $b_{s_3}^2$      | $b_{s_1}^3$      | $b_{s_2}^3$      | $b_{s_3}^3$      | $b_{s_1}^2$       | $b_{s_2}^2$       | $b_{s_3}^2$       |
| 1                           | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 |
| $l_{s_1}^2$                 | $2b_{s_1}^3$     | $2b_{s_2}^3$     | $2l_{s_1,s_2}^2$ | $2l_{s_1,s_3}^2$ | $2l_{s_2,s_3}^2$ | $2l_{s_1,s_2}^1$ | $2l_{s_1,s_3}^1$ | $2l_{s_2,s_3}^1$ | $2l_{s_1,s_2}^3$  | $2l_{s_1,s_3}^3$  | $2l_{s_2,s_3}^3$  |
| 0                           | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 |
| $l_{s_2,s_3}^3$             | $2l_{s_2,s_3}^2$ | $2l_{s_2,s_3}^3$ | $2l_{s_2,s_1}^1$ | $2l_{s_2,s_1}^2$ | $2l_{s_2,s_1}^3$ | $2l_{s_3,s_2}^1$ | $2l_{s_3,s_2}^2$ | $2l_{s_3,s_2}^3$ | $2l_{s_3,sink}^1$ | $2l_{s_3,sink}^2$ | $2l_{s_3,sink}^3$ |
| 0                           | 0                | 0                | 1                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 |
| $e_{2,c}^0$                 | $e_{2,r}^0$      | $e_{2,s}^0$      | $e_{3,c}^0$      | $e_{3,r}^0$      | $e_{3,s}^0$      | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 |
| 0                           | 0                | 0                | 0                | 1                | 0                | 0                | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 1                 |

Dane l'excel nous déclarons n=102 et 65 contrant chaque contrante est ajouté  
 d'après les vauble de paramètre donnée nous eavous la fonction objectif données  
 par  $\sum C_i x_i$

| 2/ La fonction objectif |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| C1                      | C2  | C3  | C4  | C5   | C6  | C7  | C8  | C9  | C10 | C11 | C12 |
| 3                       | 3   | 3   | 3   | 3    | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   |
| C13                     | C14 | C15 | C16 | C17  | C18 | C19 | C20 | C21 | C22 | C23 | C24 |
| 3                       | 3   | 3   | 3   | 3    | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   |
| C25                     | C26 | C27 |     |      |     |     |     |     |     |     | C0  |
| 3                       | 3   | 3   |     | E* = | 18  |     |     |     |     |     | 3   |

dans un cellule F37 nous avons écrire la formule de la fonction suivant :  
 les étapes de résolution données dans la 3eme chapitre nous trouvons les résultant  
 suivantes :

| 3/ Lescontraintes |   |   |   |   |  |
|-------------------|---|---|---|---|--|
| 1                 | 1 | 1 | 0 | 1 |  |
| 1                 | 1 | 1 | 0 | 1 |  |
| 1                 | 1 | 1 | 0 | 1 |  |
| 1                 | 1 | 1 | 0 | 1 |  |
| 1                 | 1 | 1 | 1 | 1 |  |
| 1                 | 1 | 1 | 0 | 1 |  |
| 1                 | 1 | 1 | 1 | 1 |  |
| 1                 | 1 | 1 | 1 | 1 |  |
| 1                 | 1 | 1 | 1 | 1 |  |
|                   |   |   | 1 | 1 |  |
|                   |   |   | 0 | 1 |  |
|                   |   |   | 1 | 1 |  |

— t=0 1 envoie à 3 les paquets de  $s_1$ .

— t=1 3 envoie au sink les paquets de  $s_1$ .

— t=2 2 envoie à 3 les paquets de  $s_2$ .

— t=3 3 envoie au sink les paquets de  $s_2$ .

pour t=0 :

$$e_{s_1,c}^0 = 1, l_{s_1,s_3}^1(s_1) = 1, e_{s_3,r}^0 = 1, b_{s_3}^1 = 1.$$

pour t=1 :

$$e_{s_3,c}^1 = 1, l_{s_3,sink}^2(s_1) = 1,$$

pour t=2 :

$$e_{s_2,c}^2 = 1, l_{s_1,s_3}^3(s_1) = 1, e_{s_3,r}^2 = 1, b_{s_3}^2 = 1.$$

pour t=3 :

$$e_{s_3,c}^3 = 1, l_{s_3,sink}^4(s_2) = 1.$$

pour t=2 :

$$E^* + 18, L^* = 2 | \text{min} \epsilon = 0.$$

$$E = E^*, L = L^* | \text{alors} \text{min} \epsilon = 0.$$

## 4.4 Conclusion

Dans ce travail, nous sommes intéressés à la minimisation de l'énergie et la latence dans un réseau de capteur sans fil, dans ce derniers les nœuds capteurs

sont alimentés par des batteries à faible capacité irremplaçable car ils déploient dans des zones inaccessibles.

Notre but est de prolonger la durée de vie du réseau de capteurs en minimisant la consommation d'énergie, sachant que plus le nœud source s'éloigne du nœud puits, plus la consommation de l'énergie est grande dans ce contexte.

|   |   |   |    |   |
|---|---|---|----|---|
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 2  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | -2 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 0 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 2  | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 3  | 1 |
| 2 |   |   | 1  | 0 |
|   |   |   | 0  | 0 |
|   |   |   | 0  | 0 |
|   |   |   | 0  | 0 |
|   |   |   | 0  | 0 |
|   |   |   | 1  | 0 |

# 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.

Dans ce travail, nous sommes intéressés à la minimisation de l'énergie dans ces derniers où les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries à faible capacité irremplaçable car ils déploient dans des zones inaccessibles.

Dans un premier lieu, nous avons introduit ce type de réseau, en particulier, nous avons présenté l'architecture, les caractéristiques, les facteurs influant sur la conception des réseaux de capteurs, ainsi que les domaines d'applications de ce genre de réseau. Il a été constaté que la recherche dans les réseaux de capteurs est beaucoup plus orientée vers la conservation de l'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau. Pour ce but nous avons présenté un modèle mathématique ILP dans lequel conjointement considèrent l'efficacité énergétique et la valeur de l'information (VoI) dans un RCSF. La VoI est supposée décroître avec le temps. Le but est de trouver des chemins de déplacement pour les données générées par les nœuds qui maximisent la valeur d'information des données livrées au puits tandis que minimiser autant que possible la consommation totale d'énergie. Ce modèle ILP est résolu avec la méthode de l'Excel Solver.

L'étude que nous avons menée dans le cadre de ce projet nous a permis de concrétiser l'apprentissage théorique du cycle de formation MASTER et surtout d'apprendre les différentes techniques de calcul, les concepts et les règlements régissant le domaine étudié.

Ceci nous a permis d'avoir les résultats suivants :

- ✓ L'économie d'énergie est le plus grand défi auquel est confronté le RCSF.
  
- ✓ Le prolongement de durée de vie d'un réseau est très important pour faciliter la réalisation des applications non réalisables.
  
- ✓ Pour une bonne étude d'une structure, il faut comprendre son comportement.

- ✓ Métrise la modélisation avec l'EXCEL Solveur, qui nous donne des solutions optimales.
- ✓ Construire une fonction objectif au nombre entiers d'un problème réelle.
- ✓ Découvrir le domaine informatique.  
Notre but est de maximiser la durée de vie du réseau de capteurs en minimisant la consommation d'énergie et la minimisation de latence.  
Les difficultés rencontrées au cours de l'étude, nous ont conduit à nous documenter et à étudier les méthodes que nous n'avons pas eu la chance d'étudier durant le cursus, cela nous a permis d'approfondir d'avantages nos connaissances en MATHEMATIQUES.

En fin nous avons constaté que l'élaboration d'un projet ne se base pas uniquement sur le calcul, mais plutôt sur la concordance avec l'application, nous espérons que ce modeste travail sea un apport et support pour les promotions à venir.

# Bibliographie

- [1] T. Arampatzis, J. Lygeros, S. Manesis, "A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks", in Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control - Mediterranean Conference on Control and Automation, Washington, DC, USA, pp. 719-724, 2005.
- [2] Messai, M. L., & Daabaj, K. (2012). Gestion d'un Parking par un Réseau de Capteurs Sans Fils (English Title : "Parking Management Using Wireless Sensor Networks")..
- [3] Kacimi, R. (2009). Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation).
- [4] Vallet, E., Toujours plus de murs dans un monde sans frontières. Le Devoir, 2009. 26
- [5] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-de-capteurs-sans-fil.html>
- [6] Guadane.M, protoypage rapide et évaluation en condition d'opération réelles d'algorithme de réseau pour les réseaux de capteurs sans fil , Université du Québec, 2017
- [7] Implementation d'une strategie de routage multi-niveau de données d'un réseau de capteurs sans fil dans le domaine, l'université québec a trois-rivières,juin 2014.
- [8] KAZI TANI, C. and W. BENHADDOUCHE, Implémentation et test d'un protocole de prévention de l'attaque Clone dans un réseau de capteurs sans fil. 2014.
- [9] IMINE, Y. and S.M. KADDOUR, Routage basé sur les algorithmes génétiques dans les réseaux de capteurs à grande échelle. 2016.
- [10] E. Cayirci. "Survey on Sensor Networks". IEEE Communications Magazine. 102-114. 2002.
- [11] Challal, Y., H. Bettahar, and A. Bouabdallah, Les Réseaux de capteurs (WSN : Wireless Sensor Networks). Rapport interne, Université de Technologie de Compiègne, France, 2008.

- [12] Bouallegue, M. (2016). Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université du Maine).
- [13] Basics of Wireless Sensor Networks (WSN) | Classification, Topologies, Applications.18/04/2021
- [14] McCarthy, P., Guru, S. M., Peng, W., Hugo, D., Terhorst, A. (2008, April). Wireless sensor network deployment for water use efficiency in irrigation. In Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks (pp. 46-50)
- [15] Soto, F., Suardiaz, J., Sánchez, P., Iborra, A., Vera, J. A. (2009). Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain. Computers and electronics in agriculture, 68(1), 25-35.
- [16] Yaser, Yousef. (2010). Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Mulhouse).
- [17] H. Karl, A. Wiling. "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks". John Wiley , Sons. 2005
- [18] S. M. Chowdhury, A. Hossain, Different Energy Saving Schemes in Wireless Sensor Networks : A Survey, 12 may 2020.
- [19] V. Schurgers, C. Park, S. Srivastava, M. B. (2002). Energy-aware wireless microsensor networks. IEEE Signal processing magazine, 19(2), 40-50.
- [20] W. R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. (2000, January). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences (pp. 10-pp). IEEE.
- [21] [https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/3072/mod\\_resource/content/1/Chapitre203-RCSF.pdf](https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/3072/mod_resource/content/1/Chapitre203-RCSF.pdf).
- [22] N. Messaoud et A. BAKHOUYA, Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Université Ahmed Draia - Adrar. 2021.
- [23] Haiyun Luo, Fan Ye, Jerry Cheng, Songwu lu, Lixia Zhang, "TTDD : Two-tier Data Dissemination in Large-scale Sensor Networks", MobiCom 2002.
- [24] Bidoki, N. H., Baghdadabad, M. B., Sukthankar, G., Turgut, D. (2018, May). Joint value of information and energy aware sleep scheduling in wireless sensor networks : A linear programming approach. In 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC) (pp. 1-6). IEEE.
- [25] C.H. PAPADIMITRIOU, K. STEIGLITZ, Combinatorial optimization - algorithms and complexity. Prentice Hall, 1982
- [26] <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/TDMA>
- [27] FERRAT.H, LE ROUTAGE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FILS, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2011.

- [28] M.Sacarovitch, « Optimisation combinatoire : méthodes mathématiques et algorithmiques », Hermann, 1984.
- [29] I.Charon, A.Germa, O.Hudry, «Méthodes d'optimisation combinatoire », Masson, 1996.
- [30] A. R. Ravindram. Opération research methodologies. Crc press, 2008.
- [31] L. Liberti and R. Sadykov. Introduction à la Programmation Linéaire en Nombres Entiers. LIX, Ecole Polytechnique, 2006.
- [32] <https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module-RCSF-1.html>
- [33] Khadidja, F. (2008). Techniques d'optimisation pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de magister, Université d'Oran Es-sénia, Oran, Algérie.
- [34] <https://support.microsoft.com/fr-fr/office>.
- [35] Bouallegue, M. (2016). Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université du Maine).