

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira
Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications.

Spécialité : systèmes des télécommunications.

Thème

**Optimisation de la diffusion dans un Réseau de Capteurs
Sans Fil.**

Préparé par :

➤ IBERRAKEN Letissia.

Dirigé par :

Mme BENSALAH. AZIZOU. Z

Mme MAMMERI. K

Examiné par :

Mme MEZHOUD Naima.

Mr AZNI Mohamed.

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères et profonds au bon dieu de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce travail

La réalisation de ce mémoire a été rendue possible grâce à la précieuse contribution de nombreuses personnes, à qui je souhaiterais exprimer ma profonde gratitude.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers Mme Bensalah. Z, pour son dévouement, sa patience, sa disponibilité et surtout ses conseils éclairés, qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Mme Memmeri. K pour sa collaboration précieuse et son engagement constant envers mon projet. Son rôle essentiel a grandement contribué à la réalisation réussie de ce travail.

Mes remerciements vont, également, à Mme Mezhoud. N qui a fait l'honneur de présider le jury et à Mr Azni. M d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à l'égard de Monsieur Alliche. A votre rôle en tant que professeur a été inestimable et a grandement contribué à mon développement académique et personnel.

Je tiens à souligner l'appréciation et la reconnaissance que je ressens envers toutes ces personnes, dont les contributions et le soutien ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Que mes sentiments de gratitude soient bien transmis à chacun d'entre eux, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur aide et leur soutien précieux.

Dédicace

A la mémoire de mon grand-père.

A mes parents.

Et à tous ceux que j'aime.

Table des matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Liste des algorithmes	iii
Liste des abréviations	iv
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil.

1. Introduction	3
2. Les réseaux de capteurs sans fil.....	3
Qu'est-ce qu'un capteur	4
Composants d'un capteur	5
Caractéristique du nœud capteur.....	6
3. Architecture d'un réseau de capteur sans fil	7
4. Classifications des RCSFs.....	7
5. Pile protocolaire.....	8
La couche physique	9
La Couche de liaison de données	9
La couche réseau	9
La couche transport.....	9
La couche application.....	10
6. Technologies de communications	10
Radiofréquence (RF)	10
Zigbee	10
Bluetooth Low Energy	10
LoRa.....	11
Wi-Fi	11
7. Domaines d'utilisation	11
Application militaire	12
Environnement	12
Agriculture	12
Application biologique.....	13

Surveillance de l'industrie.....	13
Application domotique	13
8. Contrainte de conception	13
Consommation d'énergie	13
Capacité de traitement limitée	13
9. Conclusion	14

Chapitre II : Les principales méthodes de diffusion dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil.

1. Introduction.....	15
2. Notion de diffusion.....	15
3. Les cas d'utilisation de la diffusion	15
Découverte du voisinage	16
Diffusion lors du Routage.....	16
4. Méthodes de diffusion.....	16
Méthodes basées sur la probabilité.....	17
Méthodes basées sur la zone	17
Méthodes basées sur la connaissance des voisins	17
5. Représentation d'un RCSF.....	17
6. Modes de diffusions.....	19
Diffusion en mode broadcast	19
Diffusion en mode unicast	19
Diffusion en mode multicast.....	19
Diffusion à plusieurs sauts.....	19
Diffusion basée sur la localisation	19
Diffusion dirigée par le contenu.....	20
Diffusion aléatoire.....	20
7. Méthodes de déploiement	20
8. Techniques de diffusion	21
Diffusion sans connaissance de voisinage.....	22
Diffusion avec connaissance de voisinage	23
Diffusion basée sur le relai	23
Diffusion basée sur les ensembles dominants connexe.....	28
Diffusion basée sur le Clustering	31
Diffusion basée sur les techniques hybride	34

Diffusion hiérarchique.....	36
Diffusion basée sur les arbres	37
9. Conclusion.....	37

Chapitre III : Proposition d'un algorithme optimisé pour la diffusion dans les Réseaux deCapteurs Sans Fil.

1. Introduction	39
2. Motivations	39
3. La méthode MPR.....	40
4. Métaheuristique ACO (Ant Colony Optimization)	41
5. Hybridation de la métaheuristique ACO et MPR.....	43
Notion de base.....	44
Formalisation	44
Probabilité de transition.....	45
Mise à jour des phéromones	45
Dépôt de phéromones.....	45
Evaporation des phéromones	46
Sélection de la meilleure solution	46
Codification de la solution.....	46
Algorithme de diffusion MPR-ACO	48
Organigramme de diffusion MPR-ACO	49
Fonctionnement de l'algorithme MPR-ACO	50
6. Evaluation des performances de l'algorithme MPR-ACO	51
Environnement de simulation.....	51
Corpus de données et scénarios d'évaluation	51
Métriques et méthodologie de simulation	51
Résultats de simulation.....	52
7. Synthèse	54
8. Conclusion.....	54
Références.....	58
Résumé	62
Abstract.....	62
Références bibliographiques.	

Liste des figures

Figure 1.1: Exemple d'un capteur Micaz [3].....	4
Figure 1.2: Architecture d'un capteur sans fil	6
Figure 1.3: Schéma décrivant le principe de fonctionnement d'un RCSF [8].....	7
Figure 1.4: Pile protocolaire des RCSF [8].....	9
Figure 1.5: Domaine d'application des RCSFs [14].	12
Figure 2.6: Abstraction d'un réseau de capteur sans fil [20].....	18
Figure 2.7: Illustration des méthodes de diffusion.	21
Figure 2.8: Représentation d'une diffusion pure	22
Figure 2.9: Exemple de sélection de points MPRs.....	24
Figure 2.10: Représentation de la diffusion MPR [26].	24
Figure 2.11: Exemple d'application de la méthode MPR.	25
Figure 2.12: Représentation d'un ensemble dominant connexe	29
Figure 2.13: Envoi d'un paquet de A vers B.	30
Figure 2.14: Organisation d'un RCSF en clusters.....	32
Figure 2.15: Exemple d'une architecture en clusters [33].	32
Figure 2.16 : Les nœuds blancs représentent l'arbre de recouvrement, les gris sont les feuilles	37
Figure 3.17: Optimisation du chemin par les fourmis au cours des itérations	42
Figure 3.18: Représentation d'un réseau de capteurs sans fils	47
Figure 3.19: organigramme de diffusion MPR-ACO.....	49
Figure 3.20: Nombre moyen de relais effectués pour la diffusion pour les deux approches MPR et MPR-ACO	52
Figure 3.21: Taux de défaillance avec 30 nœuds.....	53
Figure 3.22: Taux de défaillance pour 50 nœuds.....	53

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Paramètres de l'algorithme MPR-ACO.....50

Tableau 3.2: Les paramètres de simulation.51

Listes des algorithmes

Algorithme 2.1: Inondation aveugle.....	23
Algorithme 2.2: Méthode MultiPoint Relay [32].	26
Algorithme 2.3: Connected Dominating Set	30
Algorithme 2.4: CDS-MPR.	35
Algorithme 3.5: MPR [14].....	41
Algorithme 3.6: ACO	42
Algorithme 3.7: MPR-ACO	48

Liste des abréviations

AS : Ant System.

ACO : Ant Colony Optimization.

BLE : Bluetooth Low Energy.

BS : Base Station.

CDS : Connected Dominating Set.

CAN : convertisseur Analogique Numérique.

CH : Cluster Head.

CM : Cluster Membre.

DS : Dominating Set.

G : Gateway.

ISM : Industrial, Scientific and Medical.

ID : Identifiant.

IoT : Internet of Things.

LoRa : Long Range.

LoRaWAN : Long Range Wide Area Network.

LEACH : Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

MPR : Multi Point Relay.

MST : Minimum Spanning Tree.

MAC : Media Access Control.

NB-IoT : Narrow Band-IoT.

PEGASIS : Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems

RCSF : Réseaux de Capteurs Sans Fils.

RF : Radiofréquence.

SoC : System on Chip.

TTDD : Two-Tier Data Dessimination.

TCP : Transmission Control Protocol.

UDP : User Datagram Protocol.

VB : Virtuel Backbone.

WSN : Wireless Sensor Network.

Wi-Fi : Wireless Fidelity.

Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs ou WSN : Wireless Sensor Network) occupent une place centrale dans le contexte du développement technologique actuel. Avec la prolifération des appareils connectés et l'essor de l'Internet des objets (IoT), les RCSFs offrent une solution innovante et prometteuse pour collecter et transmettre des données dans divers domaines. Grâce aux avancées rapides de la technologie de communication sans fil, les capteurs sont devenus de plus en plus miniaturisés, économes en énergie et intelligents. Leur intégration dans des systèmes complexes a ouvert la voie à de nombreuses applications pratiques, couvrant un large éventail de domaines.

Ces applications vont de la surveillance environnementale à la gestion des infrastructures urbaines en passant par la santé connectée. Les capteurs sans fil peuvent être utilisés de manière étendue dans des domaines tels que la défense nationale et militaire, les tests environnementaux, les maisons intelligentes, les soins médicaux, le contrôle à distance des zones dangereuses, les transports urbains, l'exploration interstellaire, et bien d'autres encore. Grâce à leur polyvalence et à leur capacité à collecter et à transmettre des données de manière efficace, les capteurs sans fil jouent un rôle crucial dans la transformation numérique de divers secteurs et offrent de nombreuses possibilités d'innovation et d'amélioration des processus.

Les RCSFs ont révolutionné la manière dont nous interagissons avec le monde qui nous entoure en nous permettant d'acquérir des informations en temps réel et de prendre des décisions éclairées basées sur des données précises et fiables. Dans ce contexte de développement technologique, les RCSFs jouent un rôle clé en facilitant la collecte, la transmission et l'exploitation des données, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles opportunités et défis passionnants pour les chercheurs et les ingénieurs.

L'un des défis majeurs dans ces réseaux est d'optimiser la diffusion des données collectées par les capteurs. La diffusion efficace des données est essentielle pour assurer une transmission fiable et rapide des informations dans le réseau. Cela permet aux nœuds capteurs de partager leurs mesures avec d'autres nœuds du réseau et d'acheminer les données vers les points d'accès ou les nœuds centraux. L'optimisation de la diffusion dans les RCSFs vise à maximiser l'efficacité énergétique, minimiser les retards de transmission, assurer une couverture étendue et garantir la fiabilité des données transmises. Cette optimisation est un défi complexe en raison des contraintes inhérentes aux réseaux de capteurs sans fil, telles que la limitation des ressources, les conditions de transmission variables et la topologie dynamique.

Dans ce mémoire, nous explorerons les différentes approches et techniques de diffusion des données dans les réseaux de capteurs sans fil, en mettant l'accent sur les stratégies et les algorithmes d'acheminement de données à travers le réseau. Notre objectif est de proposer une solution efficace et adaptée pour améliorer les performances de diffusion dans les RCSFs et ainsi contribuer au développement et à l'efficacité de ces réseaux prometteurs.

Ce manuscrit est structuré en trois chapitres, la présente correspond à une introduction générale elle décrit le contexte de l'étude, la problématique, et l'organisation du document. Voici un résumé des trois chapitres :

Dans le 1^{er} chapitre, nous allons définir les réseaux de capteurs sans fils, leurs composants, leurs caractéristiques, leurs classification ainsi que leur architecture et les différents domaines de leurs utilisations.

Le 2^{eme} chapitre, introduit le concept de diffusion dans les réseaux de capteurs sans fils et s'en suit une étude exhaustive des différentes techniques de diffusion, ainsi que certains algorithmes.

Dans le chapitre trois, nous présentons notre contribution, en proposant un nouvel algorithme de diffusion, son évaluation et simulation de ses performances. Dans l'optique de résolution de la problématique concernant la couverture réseau, cela est rendu possible avec l'adaptation de l'algorithme ACO (Ant Colony Optimization) à notre méthode de diffusion basée sur le relais. La proposition est conçue de manière à couvrir la totalité de notre réseau, tout en diminuant le nombre de point relais.

Nous clôturerons ce mémoire par une conclusion générale et nous mettrons à jour les perspectives qui peuvent être envisagées afin d'enrichir notre travail.

Chapitre I

Généralités sur les Réseaux de
Capteurs Sans Fil.

1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), également connus sous l'acronyme anglais WSN (Wireless Sensor Networks), représentent une avancée technologique majeure dans le domaine des communications. Ces réseaux ont la capacité de s'auto-organiser pour collecter et transmettre des données de manière autonome. Durant la décennie passée, les RCSF ont captivé l'attention de la communauté scientifique, en raison de leur coût compétitif et de leur potentiel remarquable en matière d'observation.

Ce chapitre offre une vue d'ensemble exhaustive et approfondie des RCSF, permettant aux lecteurs de mieux appréhender les fondements théoriques et pratiques de cette technologie prometteuse. Il fournit également une base solide pour explorer les applications et les innovations futures dans ce domaine en plein essor.

2. Les réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est un système composé de capteurs interconnectés qui communiquent sans fil pour collecter, traiter et transmettre des données à un système central ou à un utilisateur final. Ces réseaux sont nés de la fusion des technologies de communication sans fil, des systèmes micro-électroniques et de l'électronique numérique. Un RCSF est un ensemble de capteurs qui fonctionnent de manière collaborative dans le but de collecter et transmettre des informations du monde réel vers le monde numérique [1].

Dans un RCSF, les capteurs sont considérés comme des nœuds (*motes en anglais*), contrôlés par un ou plusieurs nœuds de base appelés puits. Les puits ne servent de points de collecte pour les données recueillies et agissent comme une passerelle. Les données recueillies sont acheminées à travers le réseau vers une station de base, qui peut être un ordinateur ou un serveur pour l'analyse et le traitement.

Un réseau de capteurs se compose de deux types de nœuds :

- Les nœuds capteurs : ils ont pour objectif de relever des informations dans la zone de détection et de les transférer au point de collecte.
- Les nœuds puits : ils jouent un rôle central dans le réseau, en facilitant la collecte, le traitement et la transmission des données, ainsi qu'en assurant la gestion et le contrôle du réseau.

Un réseau de capteurs peut inclure une ou plusieurs stations de base, formant ainsi un réseau mono-station de base (mono-sink) ou un réseau multi-station de base (multi-sink), où la communication s'effectue par le biais d'ondes radio et se caractérise par la capacité de s'organiser sans infrastructure préalablement définie [2].

Les avantages des RCSFs sont qu'ils peuvent être déployés facilement dans des zones difficiles d'accès, ils peuvent être configurés pour fonctionner de manière autonome et ils permettent de collecter des données en temps réel sur des sites distants.

Qu'est-ce qu'un capteur

Un capteur est un dispositif micro-électronique d'acquisition de données (chargé de la collecte de data), il transforme une grandeur physique mesurée en une autre grandeur de nature électrique qui est elle aussi convertit en une information utilisable à des fins de mesure ou de commande. Les informations collectées peuvent être de la température, pression, force, les vibrations, etc. Le capteur est une simple interface entre un phénomène physique et une information manipulable. La figure 1.1 illustre un exemple de capteur.

Le signal à la sortie est numérisé pouvant ainsi être traité par des systèmes informatiques.



Figure 1.1: Exemple d'un capteur Micaz [3].

La communication dans les capteurs consomme généralement plus d'énergie que le calcul, d'où l'importance de réduire cette consommation. Les recherches visent à minimiser l'impact énergétique et optimiser l'efficacité des capteurs, en tenant compte des contraintes liées au stockage, traitement et énergie. En préservant l'énergie lors de l'exécution des tâches, la durée de vie du capteur et la longévité du réseau sont améliorées, permettant une utilisation plus durable et efficace des capteurs [4].

Composants d'un capteur

Les capteurs sans fil peuvent être divisés en plusieurs sections en fonction de leur conception et de leur fonctionnement (voir figure 1.2). Ci-dessous quelques-unes des sections les plus courantes dans un capteur sans fil [5]:

- **Capteur (unité de captage):** c'est la partie du capteur qui mesure la variable physique, telle que la température, la pression, l'humidité, etc. Le capteur peut être un dispositif électromécanique, optique, magnétique ou chimique, qui convertit la variable physique en un signal électrique.
- **Circuit d'acquisition de données :** Cette section du capteur est responsable de la conversion du signal électrique provenant du capteur en données numériques exploitables. Le circuit d'acquisition de données peut inclure un amplificateur de signal, un convertisseur analogique-numérique et un microcontrôleur.
- **Unité de traitement :** C'est la partie du capteur qui traite les données acquises pour les rendre exploitables et les transmettre sans fil. L'unité de traitement peut être un microcontrôleur, un processeur ou un système sur puce (SoC, system on chip).
- **Module de communication sans fil (émetteur-récepteur radio) :** Cette section permet la transmission sans fil des données du capteur à un point central ou à un autre capteur. Le module de communication sans fil peut être basé sur des technologies telles que le Wi-Fi, le Bluetooth, le Zigbee, le LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) ou le NB-IoT (Narrow Band Internet of Things), la portée du capteur dépend de la puissance utilisée, plus la puissance est grande, plus la consommation en énergie augmente.
- **Alimentation :** Les capteurs sans fil peuvent être alimentés par une batterie, une cellule solaire ou une source d'énergie ambiante. La section d'alimentation comprend le circuit de gestion de l'alimentation, qui régule l'alimentation électrique et permet d'optimiser la durée de vie de la batterie ou de l'énergie récoltée.

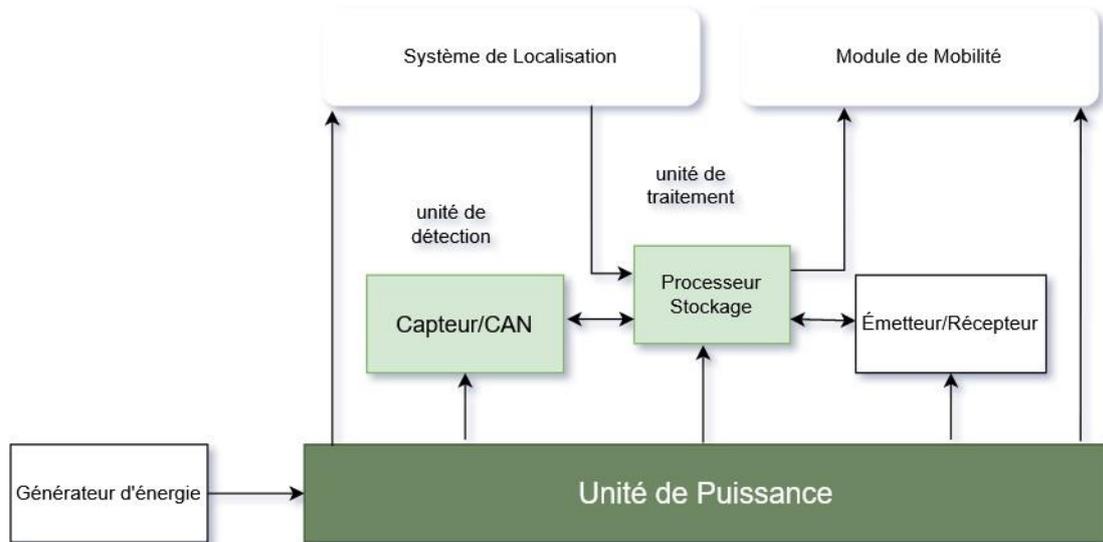


Figure 1.2: Architecture d'un capteur sans fil.

Chacune de ces sections est essentielle pour le fonctionnement du capteur, car il doit être capable de collecter, traiter et transmettre des données de manière fiable et autonome.

Caractéristique du nœud capteur

Les caractéristiques d'un capteur peuvent varier en fonction de son type et de l'application pour laquelle il est utilisé [6] :

- La précision : c'est la capacité du capteur à fournir des mesures correctes par rapport à la valeur réelle.
- La sensibilité : c'est la mesure de la capacité à détecter des changements minimes de la grandeur mesurée.
- La plage de mesure : c'est la gamme de valeurs que le capteur peut mesurer (température, pression, etc.)
- La vitesse de réponse.
- Stockage limitée.
- La linéarité : capacité à reproduire une réponse proportionnelle à la grandeur mesurée.
- La fiabilité : capacité du capteur à fournir des mesures précises de manière cohérente.
- La consommation d'énergie : c'est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire pour alimenter le capteur.

3. Architecture d'un réseau de capteur sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont composés de nœuds capteurs dispersés dans une zone appelée champ de captage (Sensor Field) ; (voir figure 1.3). Chaque nœud capteur est capable de collecter des données et de les transmettre à un puits, qui est connecté à un gestionnaire de tâches via Internet, satellite ou un autre réseau sans fil. Les données sont périodiquement acheminées vers l'utilisateur final au moyen d'une architecture multi-sauts sans infrastructure préétablie, garantissant une communication efficace et flexible tout en s'adaptant aux contraintes et conditions variables de l'environnement surveillé [7].

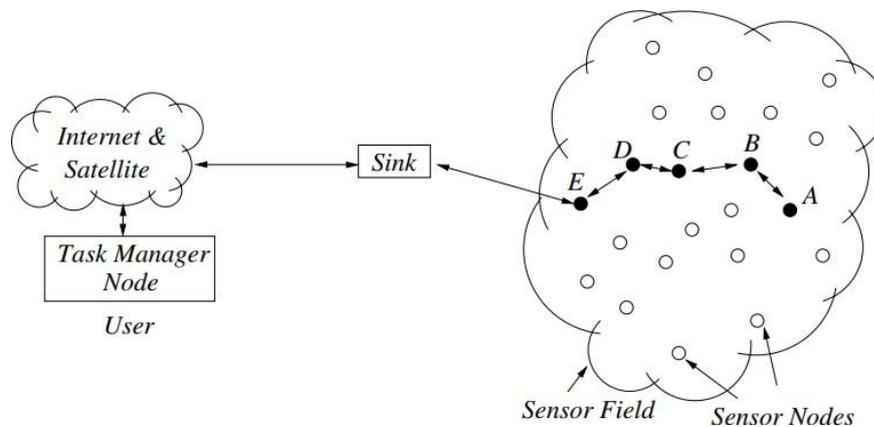


Figure 1.3: Schéma décrivant le principe de fonctionnement d'un RCSF [8].

Dans ce contexte, les capteurs s'auto-organisent pour établir des liaisons dynamiques avec la station de base, ce qui est crucial pour assurer une communication efficace entre les capteurs et la station de base. Les capteurs sont déployés de manière dense et aléatoire, offrant une couverture étendue et une collecte de données précise. Bien que ce type de déploiement présente des avantages en termes de couverture et de fiabilité, il peut également poser des défis en matière de gestion des ressources, comme l'énergie, la bande passante et la minimisation des interférences entre les capteurs. Néanmoins, les réseaux de capteurs sans fil fournissent des informations précieuses et en temps réel aux utilisateurs finaux pour diverses applications [3, 9].

4. Classifications des RCSFs

Les RCSF peuvent être classés selon plusieurs critères [10] :

- Selon le type de capteur utilisé dans le réseau :

- Homogènes : c'est-à-dire que tous les capteurs sont identiques.
- Hétérogènes : capteurs différents.
- Selon leur architecture d'organisation :
 - Architecture organisé : on distingue une organisation en arbres, en clusters ou encore hiérarchique etc.
 - Architecture non organisé : ce qui veut dire que le réseau est déployé de manière aléatoire.
- Selon leur mode de fonctionnement (actif, passif ou hybride).
- Classification selon l'environnement de déploiement :
 - Terrestres, Aérien, sous-marins ou encore spatial.
- Selon les données qu'ils traitent :
 - Scalaire : Les données scalaires font référence à des informations simples représentées par des valeurs numériques, telles que des températures, la pression etc.
 - Multimédia : les données multimédias comprennent des informations plus complexes telles que des images, des vidéos ou des fichiers audio.

5. Pile protocolaire

La pile protocolaire des RCSFs est simplifiée et adaptée à des besoins spécifiques, comblant ainsi les lacunes en termes de ressources limitées en puissance de traitement, en mémoire et en durée de vie.

La Figure 1.4 illustre la pile de protocoles employée par le puits et les différents nœuds capteurs. Cette pile intègre la gestion de l'énergie et de l'acheminement, ainsi que l'agrégation des données avec les protocoles de mise en réseau. Elle permet une communication économe en énergie via le support sans fil, tout en encourageant la collaboration entre les nœuds capteurs [11].

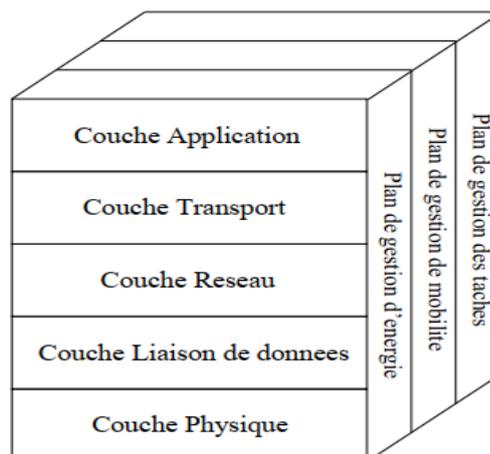


Figure 1.4: Pile protocolaire des RCSF [8].

La couche physique

Cette couche est responsable de la transmission des données brutes à travers le canal de communication sans fil. Elle est chargée de fournir une interface permettant la transmission d'un flux de bits via un support matériel. Elle est responsable de la génération et sélection des fréquences porteuses, de la détection et modulation des signaux électromagnétiques [12].

La Couche de liaison de données

La couche de liaison de données gère le transfert de données entre nœuds connectés et la gestion des erreurs de transmission. Elle nécessite un protocole MAC (Medium Access Control) efficace. Ce protocole doit inclure des caractéristiques telles que l'efficacité énergétique, l'évolutivité, la synchronisation des trames, l'équité et une utilisation optimale de la bande passante pour assurer une communication de données performante [13].

La couche réseau

Cette couche est responsable du routage des paquets de données à travers le réseau de capteurs. Elle permet d'acheminer les données depuis la source vers la destination en choisissant les chemins les plus appropriés en termes de consommation d'énergie, de latence et de qualité de service [14].

La couche transport

Cette couche assure la fiabilité et la gestion du flux de données dans le réseau. Les protocoles de cette couche incluent le protocole UDP (User Datagram Protocol) pour les applications sans garantie de livraison, et le protocole TCP (Transmission Control Protocol) pour les applications qui nécessitent une livraison fiable [1].

La couche application

Cette couche représente l'interface entre les applications des utilisateurs et le reste de la pile protocolaire. Son rôle est d'implémenter les applications et les logiciels d'interactions.

De plus, les plans de gestion de l'énergie, de la mobilité et des tâches surveillent le mouvement et la consommation d'énergie, permettant ainsi le maintien de la connectivité du réseau, et la répartition des tâches parmi les nœuds capteurs. Ainsi, ces plans aident à coordonner la détection des informations tout en optimisant la consommation globale du réseau.

Il est important de noter que cette pile protocolaire n'est pas fixe et peut varier en fonction des besoins spécifiques de chaque application WSN.

6. Technologies de communications

Les réseaux de capteurs sans fil utilisent diverses technologies de communication pour échanger des informations entre les nœuds du réseau. Quelques-unes des principales technologies de communication utilisées dans les RCSFs sont présentées ci-dessous [15]:

Radiofréquence (RF)

La communication RF est la technologie la plus couramment utilisée dans les RCSFs en raison de sa portée relativement longue, de sa faible consommation d'énergie et de sa capacité à traverser les obstacles. Les bandes de fréquences utilisées pour les RCSFs incluent les bandes ISM (Industrial, Scientific and Medical), telles que 2,4 GHz, 915 MHz et 868 MHz.

Zigbee

Zigbee est un protocole de communication sans fil basé sur la norme IEEE 802.15.4. Il est conçu pour les réseaux de capteurs à faible débit de données, faible consommation d'énergie et courte portée. Zigbee est largement utilisé dans les applications de contrôle et de surveillance, telles que la domotique, l'automatisation industrielle et la surveillance environnementale

Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE), également connu sous le nom de Bluetooth Smart, est une version économe en énergie du protocole Bluetooth classique. Il est conçu pour les applications qui nécessitent des échanges de données périodiques à faible débit et une faible consommation d'énergie. BLE est utilisé dans diverses applications de RCSF, telles que les dispositifs médicaux, les dispositifs portables et les balises de localisation.

LoRa

LoRa (Long Range) est une technologie de communication sans fil à longue portée et faible consommation d'énergie. Elle utilise la modulation par étalement de spectre pour offrir une portée étendue et une pénétration accrue des obstacles. LoRa est souvent utilisée dans les applications des RCSFs pour la surveillance à distance et les réseaux de capteurs à large échelle, tels que les réseaux de capteurs agricoles et les systèmes de suivi des animaux.

Wi-Fi

Bien que généralement associé aux réseaux locaux sans fil (WLAN), le Wi-Fi peut également être utilisé dans certaines applications des RCSFs, qui nécessitent un débit de données plus élevé et une plus grande portée que les autres technologies mentionnées. Cependant, le Wi-Fi consomme généralement plus d'énergie que les autres technologies, ce qui peut être un inconvénient pour les réseaux de capteurs sans fil à longue durée de vie.

Il est important de noter que le choix de la technologie de communication appropriée dépend des exigences spécifiques de l'application, telles que la portée, le débit de données, la consommation d'énergie et la tolérance aux interférences.

7. Domaines d'utilisation

La réduction de la taille et du coût des capteurs, l'expansion de la variété des types de capteurs disponibles (tels que thermique, optique, vibrations, etc.) et les progrès dans les technologies de communication sans fil ont étendu les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil [16].

Nous pouvons classer les applications des réseaux de capteurs sans fil en deux catégories: la surveillance et le suivi.

- *Les applications* de surveillance incluent la surveillance de l'environnement intérieur/extérieur, de la santé et du bien-être, de la consommation d'énergie, de l'emplacement des stocks, de l'automatisation des usines et des processus, ainsi que de la surveillance sismique et structurelle.
- *Les applications de suivi*, quant à elles, impliquent le suivi d'objets, d'animaux, de personnes et de véhicules.

Bien qu'il existe de nombreuses applications différentes, ci-dessous, nous décrivons quelques domaines d'application (voir figure 1.5).

Application militaire

Les réseaux de capteurs sans fil jouent un rôle crucial dans le domaine militaire, notamment en matière de commandement, de communication, d'informatique, de contrôle, de renseignement, de surveillance, de reconnaissance et de ciblage [17]. Grâce à leurs caractéristiques telles que le faible coût, le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes, les réseaux de capteurs se sont révélés particulièrement efficaces et adaptés aux exigences des applications militaires. Ces atouts permettent d'améliorer la capacité des forces armées à collecter et analyser des informations en temps réel, tout en maintenant un haut niveau de performance et de résilience face aux défis du terrain [3].

Environnement

Les RCSF sont utilisés pour surveiller les conditions environnementales telles que la qualité de l'air, la qualité de l'eau, les niveaux de bruit, la température, l'humidité et la pression atmosphérique.

Agriculture

Les RCSF sont utilisés pour surveiller les cultures et les champs pour aider à améliorer la gestion des cultures et à augmenter la production.



Figure 1.5: Domaine d'application des RCSFs [14].

Application biologique

Les applications biologiques des réseaux de capteurs sans fil ont un impact significatif sur plusieurs aspects des sciences biologiques, notamment pour la surveillance des signaux biomédicaux, les recherches en laboratoire et bien d'autre [12].

Surveillance de l'industrie

Ces réseaux sont utilisés pour surveiller les machines et les équipements industriels afin d'optimiser leur fonctionnement et de réduire les coûts de maintenance.

Application domotique

L'application en domotique fait référence à l'utilisation des technologies et des systèmes automatisés pour contrôler et gérer les fonctions de base d'une maison ou d'un bâtiment, afin d'améliorer le confort, la sécurité et l'efficacité énergétique. La domotique englobe divers aspects de la gestion d'une habitation, tels que l'éclairage, le chauffage, la ventilation, la climatisation, les systèmes de sécurité et les appareils électroménagers [12].

8. Contrainte de conception

Les réseaux de capteurs sans fil sont soumis à diverses contraintes de conception en raison de leurs caractéristiques spécifiques, comme la sécurité des transmissions, la bande passante limitée, les contraintes liées au déploiement, etc. Ci-dessous nous citons quelques-unes des contraintes courantes rencontrées lors de la conception de ces réseaux [8] :

Consommation d'énergie

La gestion de l'énergie est une préoccupation majeure dans les réseaux de capteurs, car la recharge des sources d'énergie est souvent coûteuse, voire impossible. Par conséquent, il est essentiel que les capteurs économisent au maximum leur énergie pour assurer leur bon fonctionnement.

Capacité de traitement limitée

Les nœuds capteurs ont des capacités de traitement limitées en termes de puissance de calcul, de mémoire et de capacité de stockage. Cela nécessite une conception efficace des protocoles et des algorithmes pour minimiser la charge de traitement sur les nœuds capteurs.

9. Conclusion

Au cours de ces dernières années, les Réseaux de Capteurs Sans Fil ont suscité un intérêt croissant à l'échelle mondiale. Cet intérêt est principalement motivé par les nombreuses applications rendues possibles grâce à l'architecture distribuée de ces réseaux.

L'objectif principal est de mettre en place un réseau de capteurs constitué de nœuds communicants soumis à des contraintes importantes en termes de calcul, d'énergie et de stockage. Ces capteurs sont capables de collecter des informations sur les cibles, d'extraire des données utiles et de les transmettre à des endroits éloignés via des liens sans fil.

Aujourd'hui, il existe de nombreuses solutions RCSF qui se concentrent principalement sur la mesure de phénomènes physiques scalaires tels que la pression, la température et l'emplacement. Ces mesures peuvent être satisfaites avec des systèmes ayant une bande passante limitée.

Chapitre II

Les principales méthodes de diffusion
dans les Réseaux de Capteurs Sans
Fil.

1. Introduction

En informatique et en télécommunications, la diffusion (ou broadcast en anglais) est une technique de transmission de données où un émetteur envoie une copie d'un message à tous les destinataires connectés à un réseau ou à un sous-réseau donné. Dans ce type de transmission, chaque nœud du réseau reçoit le message, mais seul le destinataire prévu le traite et le conserve, tandis que les autres nœuds l'ignorent.

Dans ce chapitre, nous nous penchons sur la diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil, une tâche essentielle au sein de ces réseaux. Nous examinons de près l'étude et la classification des principales méthodes de diffusion, telles que décrites dans la littérature existante. Du au déploiement aléatoire des nœuds capteurs et les contraintes spécifiques de chaque capteur, la diffusion est devenue un défi majeur dans les RCSFs. Deux approches principales sont considérées : l'approche centralisée et l'approche décentralisée. Dans la suite, nous nous concentrons sur l'approche centralisée, où un nœud central est chargé de la gestion de la diffusion.

2. Notion de diffusion

Dans le sens littéraire du mot la diffusion signifie un phénomène par lequel un milieu de propagation produit une répartition continue, dans de nombreuses directions, dans le domaine de la communication, la diffusion fait référence à la transmission d'informations ou de données à un grand nombre de destinataires simultanément. Cela peut se faire via différents moyens.

La diffusion dans les RCSFs est cruciale pour la propagation des paquets d'informations, car elle permet le transfert de données à plusieurs nœuds du réseau en une seule transmission. Elle peut être effectuée depuis le nœud de base vers tous les nœuds ou à un sous-ensemble spécifique. Une diffusion efficace garantit une communication fiable et économe en énergie au sein du réseau.

3. Les cas d'utilisation de la diffusion

La diffusion est un mécanisme de communication essentiel dans les RCSFs, elle permet à un nœud d'envoyer un message à tous les autres nœuds du réseau ou à un sous-ensemble d'entre eux. La diffusion est utilisée pour l'initialisation et la configuration du réseau, la découverte de la topologie et l'établissement des chemins optimaux entre les nœuds. L'efficacité

de la diffusion est cruciale pour assurer un fonctionnement optimal du réseau, minimiser la consommation d'énergie, réduire les interférences et les collisions, et améliorer la fiabilité des communications [18].

Découverte du voisinage

L'identification de l'ensemble des voisins joue un rôle crucial lors d'un déploiement aléatoire dans un réseau dynamique, en particulier pour les réseaux de capteurs sans fil, car leur topologie est souvent instable. Afin de maintenir un fonctionnement efficace du réseau, il est nécessaire de procéder à une découverte de voisinage périodique en envoyant le message 'HELLO'. La connaissance des nœuds voisins est essentielle pour plusieurs aspects du réseau, tels que l'établissement de routes optimales, la synchronisation des horloges, le partage d'informations et la coordination des activités du réseau. De plus, elle contribue à la gestion de l'énergie et à la réponse aux événements ou aux alarmes, assurant ainsi la fiabilité et la performance globales du réseau.

Diffusion lors du Routage

La diffusion est utilisée dans les méthodes de routage pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle permet de découvrir les chemins disponibles pour acheminer les paquets de données, ce qui permet de cartographier le réseau et de déterminer les nœuds connectés et les chemins possibles entre eux [10].

La diffusion est une méthode clé dans les protocoles de routage. Elle permet de trouver plusieurs chemins, ce qui optimise le routage en répartissant la charge équitablement sur les différents chemins disponibles. Cette approche permet également de trouver des chemins de secours en cas de panne de certains nœuds ou liens dans le réseau, garantissant ainsi une fiabilité accrue du routage.

En outre, la diffusion peut être utilisée pour réparer les chemins défectueux en cas de panne d'un nœud ou d'un lien. Les messages de découverte de topologie peuvent alors être utilisés pour trouver un nouveau chemin pour acheminer les paquets de données. Cette utilisation de la diffusion maintient un routage efficace et fiable dans le réseau, en trouvant rapidement des solutions de contournement en cas de panne ou de défaillance.

4. Méthodes de diffusion

Pour réaliser une diffusion efficace et résoudre le problème de la tempête de diffusion, de nombreuses méthodes ont été proposées, et sont classés en trois catégories :

Méthodes basées sur la probabilité

Elles sont similaires à la diffusion de base, sauf que chaque nœud retransmet des paquets avec une probabilité prédéterminée. Ce mécanisme pourrait fonctionner dans des réseaux denses où plusieurs nœuds ont des couvertures de voisinage similaires, mais il n'aura pas d'effet significatif dans les réseaux clairsemés, ou il y a moins de nœuds donc la probabilité que certains nœuds ne puissent recevoir l'information est d'autant plus élevée.

Méthodes basées sur la zone

Un nœud retransmet un paquet en fonction de la distance entre lui-même et son prédécesseur. Une retransmission n'a lieu que lorsque la distance est supérieure à un seuil prédéfini, de sorte qu'une zone supplémentaire plus grande puisse être atteinte. Cependant, les méthodes basées sur la zone ne tiennent pas compte de l'existence réelle de certains nœuds dans cette zone supplémentaire, ce qui peut entraîner une diffusion inefficace, ainsi une perte d'informations.

Méthodes basées sur la connaissance des voisins

On distingue deux catégories :

- La désignation des voisins : Où un nœud choisit spécifiquement quels voisins directs doivent transmettre un paquet, permettant un contrôle de la diffusion en sélectionnant les nœuds appropriés pour une transmission efficace.
- Les méthodes d'élagage automatique permettent aux nœuds qui reçoivent un paquet de décider par eux-mêmes s'ils doivent le transmettre ou non, en se basant sur les informations de leurs voisins, telles que la distance ou la qualité du lien. Cela réduit la redondance et améliore l'efficacité de la diffusion.

5. Représentation d'un RCSF

Un réseau de capteurs sans fil peut être représenté sous forme de diagramme topologique, qui montre les nœuds de capteurs individuels et leur disposition physique dans le réseau. Le diagramme topologique peut être utilisé pour représenter la structure et la connectivité du réseau, ainsi que pour visualiser les chemins de communication entre les nœuds.

Le diagramme topologique peut être représenté sous forme de graphe, où chaque capteur est représenté par un nœud du, et les liens de communication entre eux sont représentés par des

arêtes. Ce diagramme peut être représenté en deux dimensions, ou en trois dimensions, pour permettre une visualisation plus détaillée de la disposition physique des nœuds.

➤ **Théorie des graphes**

La théorie des graphes [19] peut être utilisée pour modéliser la topologie des RCSF en tant que graphes, où les nœuds capteurs sont représentés par des nœuds dans le graphe et les liaisons entre les nœuds sont représentées par des arêtes. Cette modélisation permet de décrire les caractéristiques structurelles du réseau, telles que la connectivité, la densité et la distribution des nœuds, et d'appliquer des algorithmes de théorie des graphes pour résoudre les problèmes liés à la diffusion de données dans le réseau.

Par exemple, la théorie des graphes peut être utilisée pour déterminer les chemins les plus courts entre les nœuds capteurs pour optimiser la diffusion de données, en minimisant la latence et la consommation d'énergie.

En somme, la théorie des graphes est un outil important pour la conception et l'optimisation des RCSFs pour la diffusion de données, en permettant de modéliser la topologie du réseau et d'appliquer des algorithmes de théorie des graphes pour résoudre des problèmes de diffusion de données.

Les RCSF peuvent être représentés par un graphe non orienté, où les arêtes ne sont pas orientées, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de notion de direction entre les nœuds (voir figure 2.6).

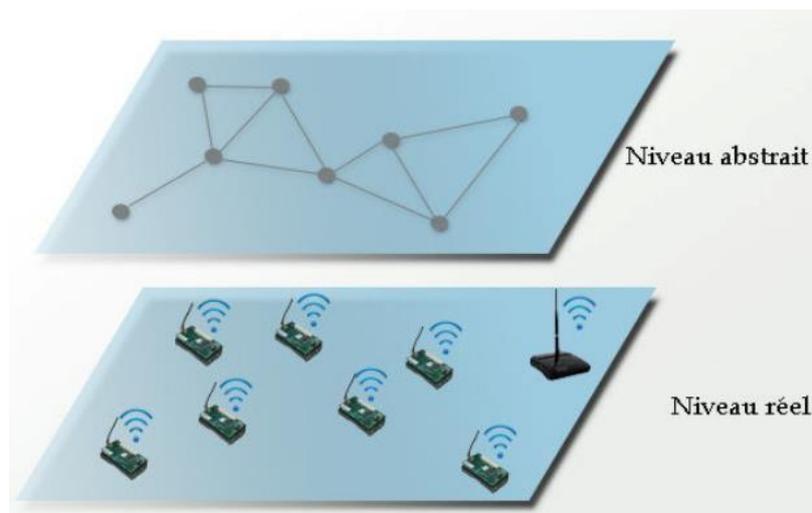


Figure 2.6: Abstraction d'un réseau de capteur sans fil [20].

6. Modes de diffusions

Il existe plusieurs méthodes de diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil. Les plus courantes sont les suivantes :

Diffusion en mode broadcast

Cette méthode consiste à diffuser un message à tous les nœuds du réseau de capteurs en même temps. Cette méthode est très simple mais elle peut être inefficace car elle consomme beaucoup d'énergie et génère beaucoup de trafic.

Diffusion en mode unicast

Cette méthode consiste à envoyer un message à un seul nœud spécifique. Cette méthode est plus efficace que la diffusion en mode broadcast, car elle permet de réduire le trafic dans le réseau.

Diffusion en mode multicast

Cette méthode consiste à envoyer un message à plusieurs nœuds spécifiques en même temps. Cette méthode est plus efficace que la diffusion en mode broadcast car elle permet de réduire le trafic dans le réseau [20].

Diffusion à plusieurs sauts

Cette méthode consiste à transmettre un message à travers plusieurs nœuds intermédiaires pour atteindre la destination finale. Cette méthode est utile dans les réseaux de capteurs où la distance entre les nœuds est importante.

Diffusion basée sur la localisation

Cette méthode consiste à envoyer un message uniquement aux nœuds situés dans une zone géographique spécifique. Cette méthode est utile pour réduire le trafic inutile dans le réseau et pour économiser de l'énergie.

Diffusion dirigée par le contenu

Cette méthode consiste à envoyer un message à un groupe de nœuds qui ont des caractéristiques similaires ou qui ont besoin d'une information spécifique. Cette méthode est utile pour réduire le trafic inutile dans le réseau et pour économiser de l'énergie.

Diffusion aléatoire

Cette méthode de diffusion est utilisée pour envoyer des données à des nœuds sélectionnés de manière aléatoire dans le réseau.

7. Méthodes de déploiement

Le déploiement des nœuds capteurs dans un RCSFs est crucial pour la performance globale du réseau, en raison de son influence sur la couverture, la connectivité, la topologie et la consommation d'énergie du réseau, différentes approches de déploiement ont été étudiées comme l'approche centralisée, distribuée et hybride, chacune se base sur différents algorithmes pour être implémentée [21]. Cependant il existe deux méthodes principales de déploiement : le déploiement contrôlé et le déploiement aléatoire [22].

Le déploiement contrôlé des nœuds dans les RCSFs, fait référence à la planification et à l'organisation stratégique de l'implantation physique des nœuds capteurs dans un environnement donné. L'objectif est d'optimiser la couverture, la connectivité et les performances globales du réseau.

Le déploiement aléatoire consiste à déployer les capteurs de manière aléatoire dans une zone donnée, sans suivre de modèle prédéfini. Cela peut poser des défis en raison des contraintes des capteurs. Il existe deux approches pour réaliser le déploiement aléatoire : le déploiement centralisé, où un seul nœud émet les données à diffuser, et le déploiement décentralisé, où une coopération entre les nœuds permet la diffusion.

L'implémentation des nœuds capteurs a un impact sur la couverture du réseau, la connectivité entre les nœuds, la topologie du réseau et la consommation d'énergie. Un déploiement stratégique permet d'améliorer la surveillance, la connectivité et la transmission des données. Une topologie bien conçue peut améliorer la performance globale en termes de latence, de débit et de résilience aux pannes. Une répartition équilibrée des nœuds capteurs contribue à réduire la consommation d'énergie.

8. Techniques de diffusion

La diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil représente un point essentiel pour la collecte de données, la communication efficace, la diffusion d'instructions et d'événements, ainsi que la mise à jour du réseau. Plusieurs méthodes de diffusion ont été proposées, chacune offrant des avantages spécifiques en termes d'efficacité énergétique, de fiabilité et d'adaptabilité. En choisissant la méthode de diffusion appropriée, il est possible d'optimiser la performance et de répondre aux spécificités du réseau. La figure 2.7 résume les techniques de diffusion que nous allons étudier dans ce chapitre.

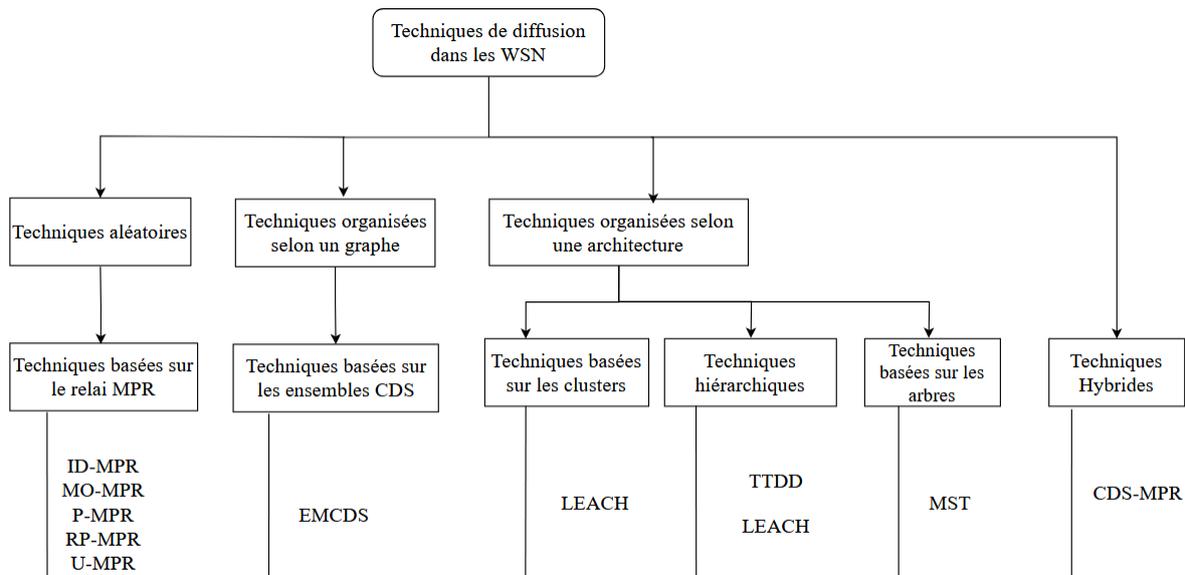


Figure 2.7: Illustration des méthodes de diffusion.

Ces techniques de diffusion sont utilisées dans le but de résoudre plusieurs problématiques comme:

- Réduction du problème de la tempête de diffusion en minimisant les nœuds chargés de la rediffusion.
- Optimisation des ressources des nœuds capteurs en tenant compte de leurs facteurs de vulnérabilités.
- Augmentation du temps de réussite des transmissions.

➤ Notion de backbone

Pour assurer l'évolutivité et l'efficacité d'un réseau sans fil, il est nécessaire de construire un backbone afin d'organiser et structuré le réseau. Les algorithmes de diffusion reposent sur le concept de réseau fédérateur [23], ce réseau virtuel est utilisé comme colonne vertébrale pour le routage, et la transmission. En utilisant ces techniques, il est possible de

choisir un groupe de nœuds capteurs qui sont interconnectés et qui assurent la couverture de tous les autres nœuds du réseau. Ce groupe est appelé "backbone" ou colonne vertébrale, et il joue un rôle dans la diffusion efficace des données à travers le réseau.

Le principe de la Dorsale Virtuelle (VB *Virtual Backbone*) consiste à créer une structure hiérarchique au sein du réseau pour améliorer la gestion des ressources et optimiser les performances. Elle est formée par un sous-ensemble de nœuds qui assurent la communication à longue distance et le routage de donnée. La VB réduit les interférences potentielles et les collisions de paquets, améliore la qualité de transmission et facilite la maintenance du réseau, en limitant les liens utilisés pour la communication. Cette approche modulaire facilite la maintenance et l'évolutivité du réseau [24]. Il agit comme une infrastructure solide qui permet de garantir le succès de la tâche de diffusion dans l'ensemble du réseau.

Diffusion sans connaissance de voisinage

La diffusion par inondation aveugle (*Blind flooding* en anglais) est une méthode simple de diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans cette méthode, chaque nœud envoie simplement le message à tous ses nœuds voisins. Les nœuds qui reçoivent le message font de même jusqu'à ce que tous les nœuds du réseau aient reçu le message.

La diffusion aveugle (voir l'algorithme 2.1) peut causer un surplus de redondance, des conflits de canal et des collisions de messages (communément appelés BSP *Broadcast Storm Problem* [25]). La figure 2.8, montre un exemple où un paquet provient du nœud S est diffusé à 3 sauts avec 49 retransmissions. Le paquet est retransmis par tous les nœuds intermédiaires afin de le diffuser dans le réseau [26].

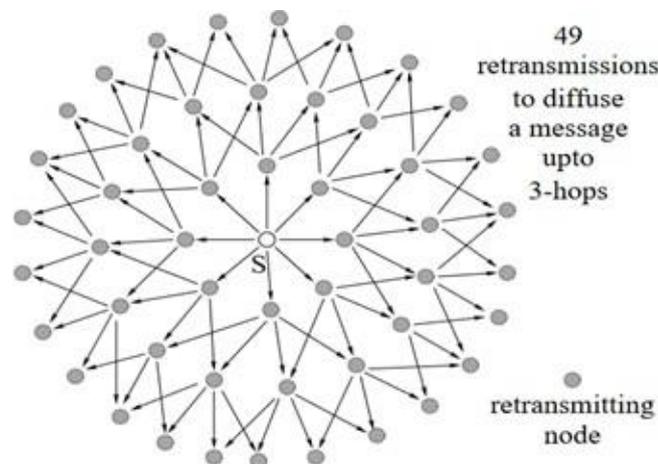


Figure 2.8: Représentation d'une diffusion pure.

Algorithme 2.1: Inondation aveugle.

****entrée :**

- n : nombre de nœuds du réseau.
- $L(i)$: ensemble des nœuds voisins de i .
- $S(i)$: ensemble des nœuds qui ont déjà reçu le message.
- m : message.

****sortie :** Message diffusé à tous les nœuds.

****Algorithme****

Pour chaque nœud i du réseau, diffuser (m) suivant ces étapes :

- Si i n'est pas dans $S(i)$, ajouter i à $S(i)$.
- Pour chaque nœud j dans $L(i)$, si j n'est pas dans $S(i)$, ajouter j à $S(i)$, et envoyer m à j .

Répéter pour tous les nœuds du réseau.

Souvent utilisée comme méthode de diffusion de secours, l'inondation aveugle peut causer de nombreux problèmes tel que l'occupation d'une grande quantité de bande passante, en raison de tant de retransmission redondante, de collision de paquets envoyé ou encore une surconsommation d'énergie.

Diffusion avec connaissance de voisinage

La diffusion avec connaissance de voisinage offre une approche efficace pour maximiser la couverture du réseau, améliorer la fiabilité des transmissions et économiser l'énergie. Cette stratégie de diffusion exploite la collaboration entre les nœuds voisins pour optimiser les performances globales du réseau de capteurs sans fil.

Diffusion basée sur le relai

Dans les réseaux de capteurs sans fil, le MultiPoint Relay (MPR) est une méthode de diffusion qui permet de réduire la redondance des transmissions de données lors de la transmission d'un message à plusieurs nœuds du réseau. Les MPR sont des nœuds de relais sélectionnés de manière à optimiser le réseau et qui sont chargés de retransmettre les messages de diffusion à tous les nœuds qui en ont besoin, sans répéter inutilement la transmission à des nœuds qui ont déjà reçu le message.

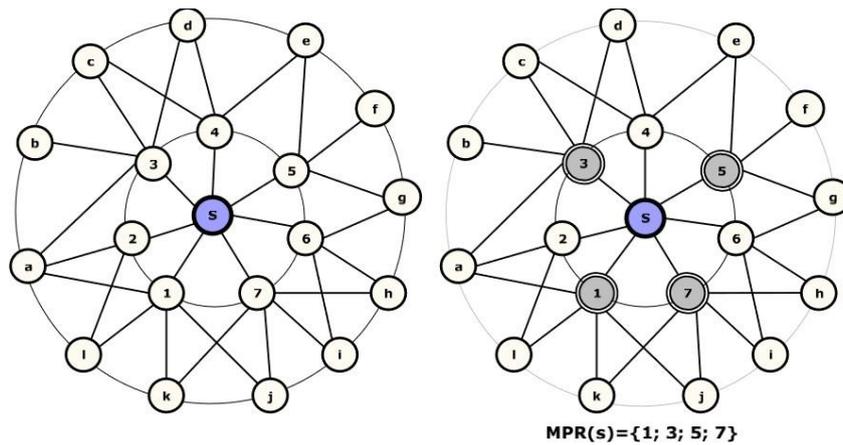


Figure 2.9: Exemple de sélection de points MPRs.

Cette méthode constitue une solution appropriée pour diminuer la saturation du réseau. Elle permet d'atteindre l'objectif d'acheminer le message vers chaque nœud, avec une probabilité élevée, tout en limitant l'encombrement des communications, réduisant ainsi considérablement la quantité d'énergie nécessaire lors de la transmission, ce qui permet d'augmenter la durée de vie du réseau et diminuer le BSP.

La méthode décrite dans l'article [27], a été appliquée pour la première fois afin de choisir un ensemble dominant connexe qui permet à la fois le routage et la diffusion.

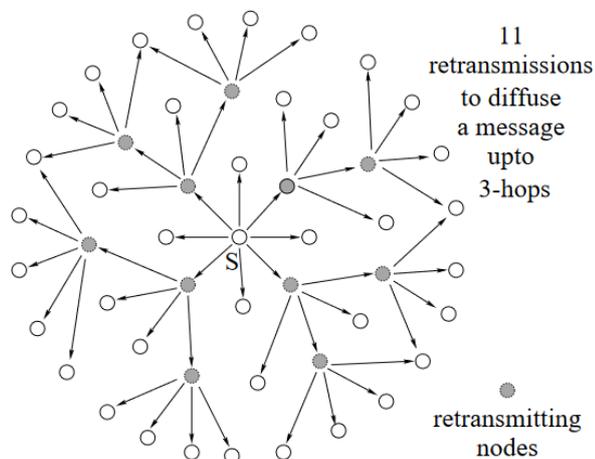


Figure 2.10: Représentation de la diffusion MPR [26].

La figure 2.10 présente un exemple de diffusion de données à partir du nœud S, en utilisant la méthode de relai multipoints. Dans cet exemple, seulement 11 retransmissions ont été nécessaires pour que le message parvienne à des nœuds situés à trois sauts [26].

L'enjeu de cette méthode est de sélectionner les relais de manière optimale (voir figure 2.11) afin d'atteindre des performances de transmission maximales dans le réseau. Cependant,

cette tâche n'est pas simple car il y a un compromis à trouver entre la complexité de l'algorithme de sélection des MPR et son efficacité dans une situation dynamique et complexe.

Un algorithme trop simple peut ne pas sélectionner efficacement les MPR, tandis qu'un algorithme trop sophistiqué peut être difficile à implémenter. Ainsi, la conception d'un algorithme de sélection de relais multipoints doit trouver un compromis entre la facilité de mise en œuvre et son efficacité [26].

Cela implique de trouver un équilibre entre ces deux aspects. Pour y parvenir, il est important de concevoir un algorithme de sélection de MPR qui :

- Soit suffisamment simple pour être facile à mettre en œuvre, à comprendre et à maintenir.
- Soit capable de fournir de bons résultats en termes de sélection des MPR, même dans des situations complexes et dynamiques.
- Minimise le trafic de contrôle et la consommation d'énergie tout en maintenant une performance adéquate du réseau.

En résumé, le compromis dans la sélection des MPR consiste à trouver un équilibre entre la simplicité et l'efficacité de l'algorithme, afin de garantir une bonne performance du réseau tout en minimisant la complexité de mise en œuvre et l'utilisation des ressources.

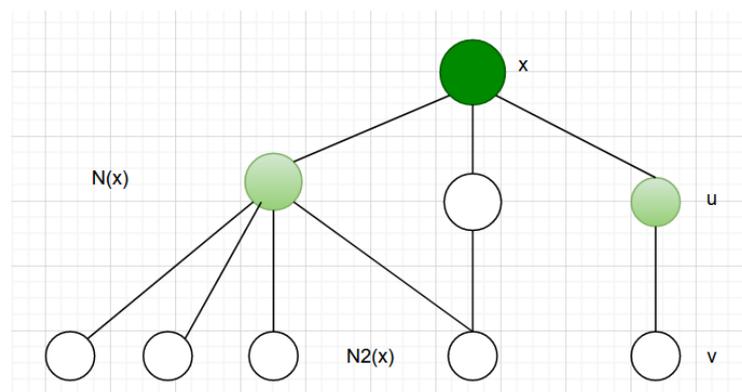


Figure 2.11: Exemple d'application de la méthode MPR.

L'algorithme 2.2 illustre une diffusion MPR.

Algorithme 2.2: Méthode MultiPoint Relay [26].

1. $MPR(x) = \emptyset$
2. Pour chaque nœud $u \in N(x)$:
 - Si u est l'unique voisin à un saut de certains nœuds $v \in N2(x)$:
 - $MPR(x) = MPR(x) \cup \{u\}$
3. Tant que $\exists v \in N2(x)$ tel que v n'est pas couvert par $MPR(x)$:
 - a) Pour chaque nœud $u \in N(x)$ et $u \notin MPR(x)$:
 - $C(u) = |\{v \in N2(x) : v \text{ n'est pas couvert et } u \text{ est voisin à un saut de } v\}|$
 - b) Trouver $u^* \in N(x) \setminus MPR(x)$ tel que $C(u^*) = \max\{C(u) : u \in N(x) \text{ et } u \notin MPR(x)\}$
 - c) $MPR(x) = MPR(x) \cup \{u^*\}$

Où :

- x est le nœud pour lequel nous sélectionnons les MPR
- $MPR(x)$ est l'ensemble des relais multipoints pour le nœud x
- $N(x)$ est l'ensemble des voisins à un saut du nœud x
- $N2(x)$ est l'ensemble des voisins à deux sauts du nœud x
- $C(u)$ est le nombre de nœuds non couverts dans $N2(x)$ que le nœud u peut couvrir
- u^* est le nœud qui maximise la couverture des nœuds non couverts dans $N2(x)$ parmi les nœuds de $N(x)$ qui ne sont pas encore dans $MPR(x)$

En utilisant des MPR, les réseaux de capteurs sans fil peuvent économiser de l'énergie et améliorer la fiabilité des transmissions de données, car les transmissions redondantes sont évitées. Dans [28] les auteurs présentent une enquête exhaustive des schémas de diffusion basée sur la méthode MPR, parmi ces méthodes on peut citer :

- **ID-MPR (In-Degree MPR) [28]** : L'in-degree est basé sur le nombre de voisins qu'un nœud a en commun avec un nœud voisin direct de la source de diffusion. En utilisant l'in-degree comme critère de sélection, la méthode ID-MPR est capable de simplifier la sélection de nœuds MPR privilégiant ainsi ceux avec un degré de connectivité élevé ce qui fait d'eux des candidats efficaces pour relayer les

messages dans le réseau. Cette méthode permet de réduire la complexité de l'algorithme tout en garantissant une sélection efficace des nœuds MPR.

- **MO-MPR (Minimum Overlapping MPR) [28]:** La méthode MO-MPR est une heuristique utilisée pour minimiser les chevauchements entre les Multipoint Relay. Le chevauchement entre les MPR se produit lorsque deux ou plusieurs MPR couvrent les mêmes voisins à deux sauts. Dans cette méthode, le chevauchement est considéré préjudiciable à la réception du message en raison des interférences de signal. Pour réduire les chevauchements, l'heuristique répartit les MPR de manière aussi uniforme que possible autour du nœud source, ce qui limite l'interférence globale dans le réseau. Cela est accompli en utilisant un ratio de couverture pour les voisins à un saut plutôt que le degré de sortie comme dans la méthode MPR originale.

La méthode MO-MPR suit les trois premières étapes utilisées dans la méthode MPR originale et choisit un nœud avec le ratio de couverture minimum comme MPR pour couvrir les voisins à deux sauts restants. Cela signifie que la méthode MO-MPR privilégie les nœuds qui ont moins de voisins à deux sauts non couverts pour minimiser les chevauchements entre les MPR et donc réduire l'interférence globale dans le réseau.

Cette heuristique ne peut pas réduire le nombre maximum de chevauchements par nœud étant donné que ce nombre dépend principalement de la topologie, qui peut changer de manière arbitraire. Cependant, il est possible de limiter l'impact global des chevauchements dans un réseau.

- **P-MPR (Prioritized MPR) [28] :** La méthode P-MPR est une heuristique qui vise à minimiser les chevauchements dans le schéma MPR sans augmenter le nombre de relai nécessaires pour couvrir un réseau. Plutôt que d'utiliser le degré de sortie maximal comme dans la méthode MPR d'origine, la méthode P-MPR choisit le nœud ayant le degré de sortie minimal. Ainsi quand il y a plus d'un nœud du 1^{er} voisinage capable de couvrir les nœuds du 2nd, le choix se porte sur celui avec le degré de couverture minimal.
- **RP-MPR (Random Prioritized MPR) [28] :** Les techniques P-MPR et RP-MPR sont identiques, sauf dans le choix du nœud MPR, celui-ci se fait de manière aléatoire.

- **U-MPR (Utility-Based MPR) [28]** : Elle s'appuie sur le schéma MPR d'origine. Elle vise à réduire les retransmissions inutiles en limitant la retransmission aux nœuds essentiels afin de minimiser la consommation d'énergie et augmenter la longévité du réseau.

L'UMPR utilise une fonction d'utilité de transmission U_f pour choisir les nœuds les plus adaptés pour la diffusion. La fonction d'utilité de transmission est calculée pour chaque voisin à un saut du nœud source S, comme suite $U_f = U_p * U_n$.

Elle est composée de deux parties :

- L'utilité de puissance à un saut U_p : elle donne la valeur de la puissance restante d'un nœud, plus la valeur est grande, plus il reste de puissance.
- L'utilité de voisinage U_n : représente le ratio des nœuds non couverts à deux sauts parmi tous les nœuds à deux sauts qu'un voisin à un saut couvre. La fonction d'utilité de transmission est utilisée pour déterminer la désirabilité de chaque voisin à un saut comme relais potentiel de la diffusion.

Diffusion basée sur les ensembles dominants connexe

La diffusion basée sur les ensembles dominant connexe (*Connected Dominating Set CDS, en anglais*) est une approche utilisée pour diffuser des informations de manière efficace et économe en énergie à travers un RCSF [26].

Un ensemble dominant (DS: Dominating Set) dans un réseau est un sous-ensemble de nœuds qui assure que chaque nœud est soit dans le DS lui-même, soit adjacent à un nœud du DS (figure 2.12). Lorsque le sous-graphe formé par le DS est connecté, on parle alors de CDS. Le CDS est un sous-ensemble du réseau, ayant les propriétés suivantes :

- Tous les nœuds du CDS sont connectés entre eux, formant ainsi un réseau sans fil connexe.
- Chaque nœud du réseau qui n'est pas dans le CDS est adjacent à au moins un nœud du CDS, autrement dit, chaque nœud non-CDS doit être à portée de communication directe d'un CDS.
- Connectivité : les CDS forment un sous-graphe connecté.

La défaillance d'un seul nœud de capteur dans les ensembles dominants connexe entraine un morcellement du réseau et une perte de connectivité.

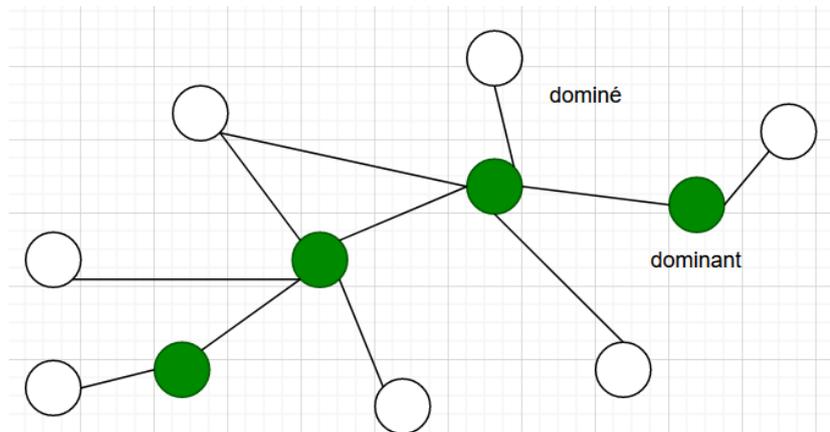


Figure 2.12: Représentation d'un ensemble dominant connexe.

Fonctionnement d'un CDS [29] :

- 1. La sélection des nœuds dominants :** Un algorithme de sélection est utilisé pour choisir un ensemble de nœuds qui couvrent tous les autres nœuds du réseau. Les nœuds choisis forment une colonne de CDS.
- 2. Construction de l'arbre couvrant :** Les nœuds dominants établissent des liens entre eux pour former un arbre couvrant. Cet arbre assure la connectivité entre tous les nœuds dominants, et par conséquent tous les nœuds du réseau.
- 3. Transmission des données :** Les nœuds non-dominants transfèrent leurs données vers les nœuds dominants les plus proches, ces derniers agissent alors comme des relais pour acheminer les données vers la station de base.

Nous présentons l'algorithme 2.3 qui identifie un ensemble dominant connecté en "élaborant" progressivement un arbre.

Algorithme 2.3: Connected Dominating Set.

Soit $G(V, E)$ un graphe non dirigé, où V est l'ensemble des sommets et E l'ensemble des arêtes.

1. Initialisation :

- $T = \emptyset$ (l'arbre vide)
- Marquer tous les nœuds comme blancs (non marqués)
- Sélectionner le nœud v de degré maximal, c'est-à-dire, le sommet avec le plus grand nombre de voisins, et ajoutez-le à l'arbre T . Ce sommet sera le point de départ pour construire l'arbre.

2. Ajouter v à T .

3. Tant qu'il reste des nœuds blancs (non marqués) dans le graphe :

Choisir un nœud v dans T qui n'a pas été scanné (c'est-à-dire coloré en noir)

Scanner v :

- colorier v en noir.

Pour chaque voisin u de v qui n'est pas dans T :

- ajouter u à T .
- marquer u comme gris (marqué mais non scanné)
- ajouter l'arête (v, u) à T

4. Le CDS est composé de tous les nœuds noir (scannés) de T .

Le principe de transmission du nœud A vers B (figure 2.13) repose sur le fait que chaque nœud dominé connaît son dominant et réciproquement.

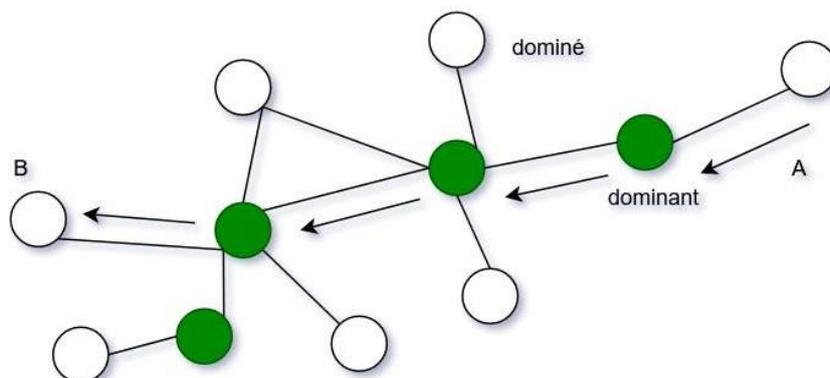


Figure 2.13: Envoi d'un paquet de A vers B .

Les algorithmes de construction de CDS dans les réseaux sans fil se répartissent en deux catégories principales [21]:

1. **Centralisés** : Exécutés sur un nœud central, ils permettent de générer un CDS plus petit et performant en utilisant des méthodes telles que la construction d'arbres couvrants et des algorithmes gloutons. Les algorithmes centralisés sont plus adaptés aux situations où un contrôle centralisé est possible.
2. **Décentralisés** : Ils sont conçus pour les environnements où il n'y a pas de contrôle centralisé et se divisent en deux types :
 - a. **Distribués** : Ces algorithmes trouvent d'abord un ensemble indépendant maximal (MIS) et, ensuite, connectent les nœuds de cet ensemble pour former un CDS. Ils sont généralement basés sur des approches en deux phases et sont adaptés aux situations où la communication est décentralisée.
 - b. **Localisés** : Ces algorithmes utilisent des informations de connectivité des voisins à une distance de 1 ou 2 sauts pour déterminer rapidement un CDS. Ils sont plus efficaces en termes de complexité des messages et du temps de calcul, et conviennent aux réseaux où les nœuds ont des capacités de calcul et de communication limitées [21].

Les algorithmes décentralisés sont généralement plus adaptés aux réseaux sans fil en raison de leur nature distribuée et des contraintes d'énergie et de communication des nœuds.

L'ensemble dominant connecté, est un sous-graphe connecté dérivé du graphe initial qui représente le réseau. Il est important de garder à l'esprit que l'objectif est de minimiser la taille de cet ensemble c'est-à-dire réduire le nombre de nœuds dominants. C'est pourquoi la plupart des recherches visent à sélectionner un CDS de taille réduite EMCDS [30], afin d'optimiser l'efficacité énergétique du système [31].

Diffusion basée sur le Clustering

La diffusion basée sur les clusters constitue une approche de communication pour les réseaux de capteurs sans fil, cela se fait en regroupant les nœuds en clusters (grappe) afin d'optimiser la transmission. Pour assurer l'évolutivité des RCSFs, de nombreux algorithmes de clustering ont été développés, permettant la formation de clusters stables. Ces algorithmes prennent en compte des exigences spécifiques, comme la longévité du réseau, la couverture et

l'économie d'énergie [32], rendu possible notamment grâce à la centralisation du traitement des données.

Chaque grappe est dirigée par un chef, souvent appelé chef de groupe dit cluster Head (CH). Les CHs ont un rôle central, puisqu'ils sont chargés de collecter, d'agréger et de transmettre les données des membres du cluster [24]. Les nœuds restants sont dit membre du cluster CM (Cluster Membre) [10], le lien entre les groupes se fait soit directement en reliant les CH, soit par l'intermédiaire de nœuds appelé nœud passerelle G (Gateway), comme montré dans la figure 2.14.

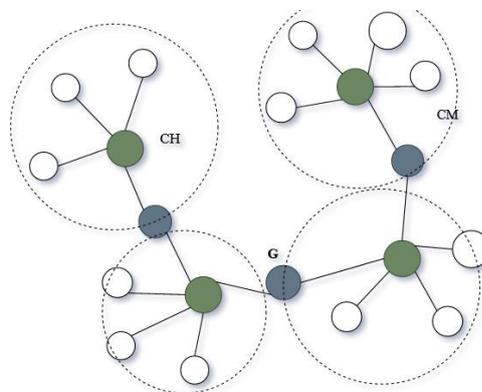


Figure 2.14: Organisation d'un RCSF en clusters.

Le concept de diffusion en exploitant les clusters repose sur l'emploi du backbone constitué par les clusters head et les Gateway, permettant ainsi l'acheminement des données à travers le réseau.

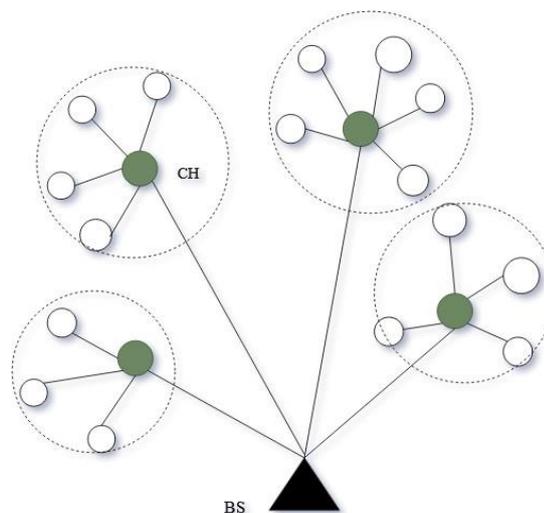


Figure 2.15: Exemple d'une architecture en clusters [33].

Le CH coordonne la transmission et l'agrégation des données intra-cluster, agissant comme un coordinateur local (voir figure 2.15). Les données agrégées sont envoyées à un autre CH plus proche de la station de base (*Base Station BS*), puis les CH transmettent les données collectées à la BS. Les CH envoient les données agrégées à la station de base. Étant donné que la bande passante sans fil et la puissance des nœuds sont limitées, il est essentiel de minimiser les données transmises à la BS. Une collaboration locale entre les capteurs sans fil au sein d'un cluster permet de réduire la demande en bande passante [34].

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un protocole de communication pour les RCSFs qui vise à prolonger la durée de vie du réseau en répartissant équitablement la consommation d'énergie parmi les nœuds capteurs. LEACH se base sur la création de clusters, l'élection des clusters head pour gérer la collecte, l'agrégation et la transmission des données au sein de chaque cluster. Ci-dessous une explication plus détaillée des principales caractéristiques de LEACH [35] :

- **Formation de clusters distribuée** : LEACH utilise un algorithme distribué. Les nœuds de capteurs prennent des décisions autonomes pour devenir CH selon une probabilité prédéfinie (p). Lorsqu'un nœud choisit de devenir CH, il communique sa décision aux autres nœuds du réseau.
- **Association des nœuds aux CH** : Les nœuds qui ne sont pas des CH rejoignent le cluster dont le CH peut être atteint en utilisant le moins d'énergie possible. Cela permet de minimiser la consommation lors de l'échange de données entre les nœuds et leurs CH respectifs.
- **Rotation aléatoire des CH** : Afin d'équilibrer la consommation d'énergie et d'étendre la longévité du réseau, les CH sont choisis de façon aléatoire lors de chaque cycle, permettant ainsi une répartition équilibrée de la charge énergétique parmi les capteurs.
- **Agrégation des données** : Les clusters head gèrent l'agrégation des données provenant des nœuds de leur cluster, permettant de diminuer la quantité de données échangées dans le réseau et ainsi d'économiser de l'énergie.
- **Communication à un seul saut** : LEACH utilise une topologie à un seul saut, où chaque nœud peut transmettre directement ses données au CH. Ils envoient ensuite les données agrégées à la station de base.

Cependant, LEACH présente certaines limitations, telles que le fait qu'il ne soit pas adapté aux réseaux déployés dans de vastes régions ou lorsque les CH sont éloignés de la station de base. Pour pallier ces problèmes, de nombreux algorithmes ont été proposés pour améliorer LEACH, [35], notamment LEACH-C, E-LEACH, TL-LEACH [39], EEPSC, PEGASIS [14] etc.

Diffusion basée sur les techniques hybride

La combinaison de plusieurs méthodes de diffusion forme la technique hybride, cette collaboration permet la sélection d'un backbone facilitant ainsi la diffusion des paquets de données. Parmi ces techniques hybrides, nous avons la méthode CDS-MPR qui utilise des relais pour construire un ensemble dominant connexe.

La technique CDS-MPR repose sur la connaissance des nœuds de relais sélectionnés par la méthode MPR et des identifiants ID des nœuds du premier et du second voisinage. L'objectif de cette technique est de construire un CDS qui servira de backbone pour faciliter les communications, y compris la diffusion de données, dans un réseau.

Pour qu'un nœud A soit considéré comme faisant partie du CDS, il doit respecter les règles suivantes [37, 38] :

1. Le nœud A doit avoir le plus petit ID de son premier voisinage. Cela signifie que parmi les nœuds qui sont directement connectés à A, A doit avoir l'identifiant le plus petit.
2. Le nœud A doit avoir été sélectionné comme nœud MPR, et le nœud qui l'a choisi doit avoir le plus petit ID parmi tous les nœuds du premier voisinage de A. Cette règle implique que A doit être désigné comme un nœud MPR, ce qui signifie qu'il joue un rôle crucial dans la diffusion des données. En sélectionnant le nœud MPR avec le plus petit ID, on favorise une certaine hiérarchie dans la construction du CDS, ce qui peut conduire à une diffusion plus efficace et une meilleure gestion des ressources du réseau.

Présenter ci-dessous l'algorithme 2.4 CDS-MPR :

- Entrée : Graphe $G = (V, E)$ représentant le réseau, où V est l'ensemble des nœuds et E est l'ensemble des arêtes.

- Sortie : CDS, un ensemble dominant connexe, et MPR, l'ensemble des nœuds MPR correspondants.

Algorithme 2.4: CDS-MPR.

1. Initialisation :
 - $CDS = \emptyset$
 - $MPR = \emptyset$
2. Pour chaque nœud v dans V :
Si $\text{deg}(v) = 1$ (degré 1) :
 - $v \in CDS$ (Ajouter v à CDS).
 - $v \in MPR$ (Ajouter v à MPR).
Sinon :
 - Calculer $\text{deg}(v)$
 - Si \exists un voisin u de v tel que $\text{deg}(u) > \text{deg}(v)$:
 - Ajouter v à MPR
3. Pour chaque nœud v dans V :
Si $v \notin CDS$:
Pour chaque voisin u de v :
Si $u \in MPR$:
 - Ajouter u à CDS.
4. Retourner CDS et MPR.

Dans cette formulation mathématique, $\text{deg}(v)$ représente le degré du nœud v , c'est-à-dire le nombre d'arêtes connectées à v .

L'algorithme parcourt chaque nœud v du graphe. Si v a un degré égal à 1, cela signifie qu'il est isolé, donc il est ajouté à la fois à CDS et à MPR. Sinon, si le degré de v est inférieur au degré d'un de ses voisins, v est ajouté à MPR.

Ensuite, pour chaque nœud v qui n'appartient pas encore à CDS, l'algorithme parcourt ses voisins u et vérifie si u est un nœud MPR. Si c'est le cas, u est ajouté à CDS.

Finalement, l'algorithme retourne l'ensemble CDS, qui représente l'ensemble dominant connexe, et l'ensemble MPR contenant les nœuds MPR correspondants.

Diffusion hiérarchique

La diffusion hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil est une méthode de communication et de routage qui divise le réseau en plusieurs niveaux hiérarchiques pour gérer efficacement la distribution de l'information et la consommation d'énergie. Dans cette approche, les nœuds du réseau sont organisés en une structure arborescente, avec un nœud racine au sommet et les nœuds de niveau inférieur connectés en descendant.

La diffusion hiérarchique attribue des rôles spécifiques en fonctions des positions des nœuds dans le réseau autrement dit de leur niveau hiérarchique.

La diffusion hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil implique l'organisation des nœuds en niveaux. Les nœuds de rang inférieur collectent et envoient des données aux nœuds de rang supérieur, qui traitent et agrègent ces informations. Ce processus continue jusqu'à ce que les données soient acheminées vers la station de base.

Souvent, les réseaux de capteurs sans fil utilisent des techniques de diffusion hiérarchique, comme le protocole LEACH cité précédemment, ainsi que le protocole de dissémination TTDD.

TTDD est l'acronyme de Two-Tier Data Dessimination, ce qui signifie diffusion de données à deux niveaux, l'article [39] fait référence à un mécanisme de gestion de données basé sur :

- a. Construction d'une structure en grille : Chaque source de données dans TTDD construit de manière proactive une structure qui divise le terrain en cellules, couvrant ainsi l'ensemble de la zone.
- b. Diffusion des requêtes : Lorsqu'un point de collecte souhaite récupérer des données, il inonde sa requête à l'intérieur de sa cellule locale. Cela signifie que la requête est propagée uniquement aux capteurs situés dans cette cellule.

La structure en grille facilite la diffusion des requêtes et des données en limitant la portée de propagation, réduisant ainsi la consommation d'énergie et les collisions dans les transmissions sans fil.

Diffusion basée sur les arbres

La technique de diffusion en arbre consiste en la construction d'une structure arborescente (voir figure 2.16) dans le but de relier tous les nœuds du réseau. La construction de l'arbre se fait à partir d'un graphe dans l'objectif de minimiser les distances entre les capteurs, ainsi réduire la latence et la consommation d'énergie. Dans [40], les auteurs proposent un algorithme de construction d'arbre, basé sur un arbre de recouvrement de coût minimal également appelé Minimum Spanning Tree (MST) en anglais. Les auteurs de [40] considèrent cette approche comme une méthode de contrôle de la topologie des réseaux de capteurs.

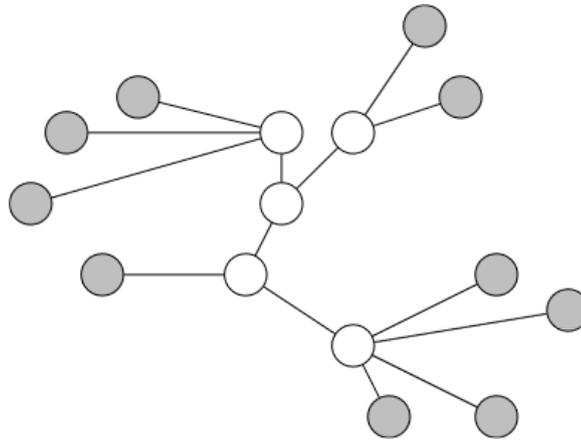


Figure 2.16 : Les nœuds blancs représentent l'arbre de recouvrement, les gris sont les feuilles.

La formation des arbres de recouvrement peut être réalisée de différentes manières, notamment grâce à des algorithmes tels que l'algorithme de Prim [41]. Celui-ci permet de sélectionner les arêtes de poids minimal afin de construire un arbre couvrant efficace. Le principe des arbres de recouvrement minimal consiste à trouver un sous-graphe connecté qui inclut tous les nœuds du réseau en minimisant le poids total des arêtes. Cela permet d'optimiser la communication et la gestion des données dans les réseaux sans fil.

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré différentes méthodes et algorithmes de diffusion utilisés dans les RCSFS. Le choix de la méthode de diffusion dépend des besoins spécifiques du réseau et des contraintes du système. Cependant, il est important de noter qu'aucune méthode de diffusion n'est universellement applicable à tous les scénarios WSN. Donc le choix de la méthode dépend des caractéristiques spécifiques du réseau, des objectifs de performance et des contraintes du système.

Enfin, les différentes méthodes de diffusion présentées dans ce chapitre démontrent l'importance de choisir une approche adaptée aux exigences spécifiques des RCSFs. La recherche continue, ouvrant ainsi la voie à des applications innovantes dans divers domaines tels que l'IoT[29].

Dans le chapitre suivant, nous allons exploiter la métaheuristique ACO (Ant Colony Optimization) pour la résolution des problèmes de diffusion avec la technique de multi point relai.

Chapitre III

Proposition d'un algorithme optimisé
pour la diffusion dans les Réseaux de
Capteurs Sans Fil.

1. Introduction

Ce chapitre présente notre contribution qui repose sur une méthode de diffusion utilisant des relais multipoints (MPR) et la métaheuristique d'optimisation par colonie de fourmis (ACO, Ant Colony Optimization) pour améliorer la diffusion des transmissions dans les réseaux de capteurs sans fil.

L'algorithme ACO, inspiré du comportement des colonies de fourmis dans la nature, est utilisé pour résoudre le problème d'optimisation de la diffusion. Cette métaheuristique a fait ses preuves dans de nombreux domaines pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. La combinaison des deux approches vise à maximiser l'efficacité de la diffusion en minimisant les ressources utilisées (nombre de points relais) tout en maintenant une couverture complète du réseau.

2. Motivations

L'intelligence collective est une branche de l'intelligence artificielle qui tire son inspiration du comportement intelligent observé chez les groupes d'insectes sociaux évoluant dans des écosystèmes naturels, tels que les abeilles, les fourmis, les guêpes et les termites [42].

Ces dernières années, de nombreux chercheurs se sont tournés vers la nature pour trouver des inspirations et des concepts innovants dans la résolution de problèmes combinatoires. En observant les phénomènes naturels tels que l'intelligence des animaux ou l'intelligence collective des insectes sociaux, Dans le domaine de l'optimisation, les métaheuristicques sont des approches de résolution qui ne dépendent pas d'un modèle mathématique précis du problème, mais plutôt de principes généraux guidant l'exploration de l'espace de recherche. Les métaheuristicques se distinguent par leur capacité à trouver des solutions de qualité dans des espaces de recherche complexes et de grande dimension [43].

Ce passage expose la motivation d'utiliser l'ACO pour résoudre le problème de diffusion dans les RCSFs. La diffusion de messages pas les points de relais dans les réseaux de capteurs sans fil est une problématique complexe, nécessitant une maximisation de la couverture du réseau tout en minimisant le nombre de nœuds MPRs.

Les techniques traditionnelles de diffusion rencontrent des limitations en termes d'optimisation de la couverture du réseau et de contrôle du nombre de nœuds MPR. L'ACO

offre une approche inspirée de la nature pour résoudre ce problème. C'est pourquoi une adaptation appropriée de l'ACO est nécessaire. En utilisant des heuristiques basées sur la proximité des nœuds non couverts et la disponibilité des nœuds MPR, les fourmis peuvent construire des solutions optimales pour la diffusion dans les RCSFs. Les niveaux de phéromones peuvent être ajustés pour favoriser la sélection de nœuds relais offrant une meilleure couverture tout en limitant le nombre de nœuds relais utilisés.

Cette approche permet de maximiser la couverture du réseau tout en limitant les nœuds MPRs, garantissant ainsi une diffusion efficace des messages. En adaptant ACO de cette manière, nous pouvons résoudre la problématique de la diffusion d'une manière optimale et efficace dans les réseaux de capteurs sans fil.

3. La méthode MPR

L'algorithme proposé par Qayyum [26] est basé sur une heuristique glouton pour trouver les MPRs, cependant cet ensemble ne peut être une solution optimale dans les réseaux à grande échelles. Dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, les nœuds sont connectés à des nœuds relais par une liaison asymétrique bidirectionnelle. Cette liaison permet aux nœuds d'envoyer des paquets de données via les MPRs, ce qui leur permet d'atteindre tous les nœuds voisins dans un rayon de deux sauts.

L'objectif est de minimiser le nombre de nœuds MPRs nécessaires pour assurer la diffusion dans le réseau. En identifiant l'ensemble minimum de MPR, on réduit le nombre de relais nécessaires tout en maintenant une diffusion totale. Etant donné que la responsabilité de retransmission des messages repose sur eux, la sélection de cet ensemble est donc très importante, car elle affecte directement le réseau.

Beaucoup d'améliorations ont été apportées à l'algorithme de sélection classique, par Zhang Hong et al [44], qui ont utilisé un algorithme mathématique afin d'améliorer la sélection des relais, le délai de transmission des données s'est vu réduit, mais sa convergence n'est pas optimale étant donné la complexité des calculs. Zhang X, Zeng [45] ont utilisé un algorithme génétique pour améliorer la sélection des nœuds relais, mais son effet n'est pas aussi bon que l'algorithme classique. La dernière amélioration apportée à cette méthode a été réalisée par Dong et al [46] proposant un meilleur schéma de sélection des MPRs, cet algorithme consiste à trouver un ensemble de voisins à une distance d'un nœud donné dans un réseau. L'algorithme 3.5 résume le fonctionnement de la proposition.

Algorithme 3.5: MPR [46].

1. Numéroté les voisins à un saut avec des lettres et les voisins à deux sauts avec des chiffres, et initialiser l'ensemble MPR à vide.
2. Former les ensembles F et S ; F et S sont les voisins à un saut et à deux sauts respectivement.
3. Trier l'ensemble F en fonction du nombre de voisins à deux sauts qu'il peut connecter.
4. Parcourir l'ensemble F trié, identifier les voisins à deux sauts qui sont connectés uniquement à l'un des voisins à un saut x, et ajouter x à l'ensemble MPR. Supprimer les voisins à deux sauts connectés à x.
5. Si aucun voisin à un saut n'est trouvé, supprimer le plus petit élément de F. Effectuer une union des voisins à deux sauts connectés par les éléments de F. Vérifier si les voisins à deux sauts non marqués correspondent à ceux connectés par S. Supprimer ou déplacer l'élément en conséquence. Répéter jusqu'à ce que MPR soit complètement parcouru.
6. L'algorithme se termine lorsque tous les éléments de MPR sont parcourus.

L'algorithme utilise les informations sur les voisins à deux sauts pour construire l'ensemble d'MPRs avec un nombre réduit.

4. Métaheuristique ACO (Ant Colony Optimization)

La métaheuristique d'optimisation ACO (Ant Colony Optimization) est une technique inspirée par le comportement des fourmis dans leur recherche de chemin le plus court entre leur nid et une source de nourriture. Elle a été développée dans les années 90 par Marco Dorigo et al [47], [48]. L'idée principale d'ACO est de modéliser le problème d'optimisation sous la forme d'un problème de recherche de chemin (figure 3.17). Initialement conçu pour résoudre le problème du voyageur de commerce, en proposant le 1^{er} algorithme ACO: Ant System (AS) [49].

Le processus de recherche d'ACO commence par l'initialisation d'une population de fourmis qui se déplacent dans l'espace de recherche. Chaque fourmi suit des règles simples pour décider de son prochain mouvement, en prenant en compte à la fois les informations locales (phéromones présents sur les chemins) et les informations globales (meilleure solution trouvée jusqu'à présent). Au fur et à mesure que les fourmis explorent l'espace de recherche, elles déposent des phéromones sur les chemins qu'elles parcourent, favorisant ainsi la sélection des

chemins les plus courts. Les phéromones s'évaporent progressivement avec le temps, ce qui permet au système de rechercher de nouvelles solutions.

Ainsi, dans ce processus, il existe une rétroaction positive où la probabilité pour une fourmi de choisir un chemin donné augmente à mesure que le nombre de fourmis ayant emprunté ce même chemin auparavant augmente.

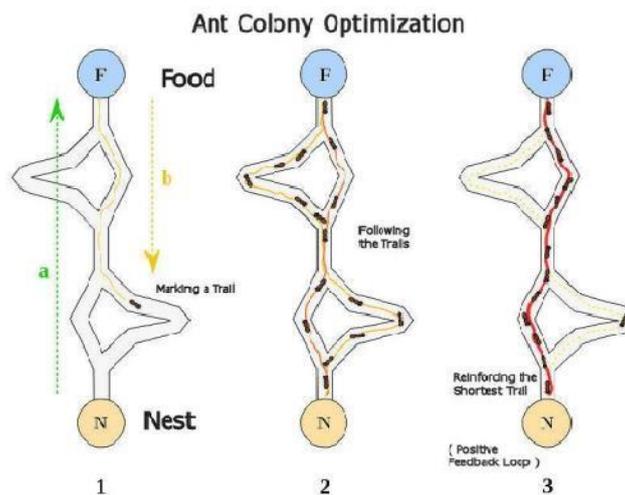
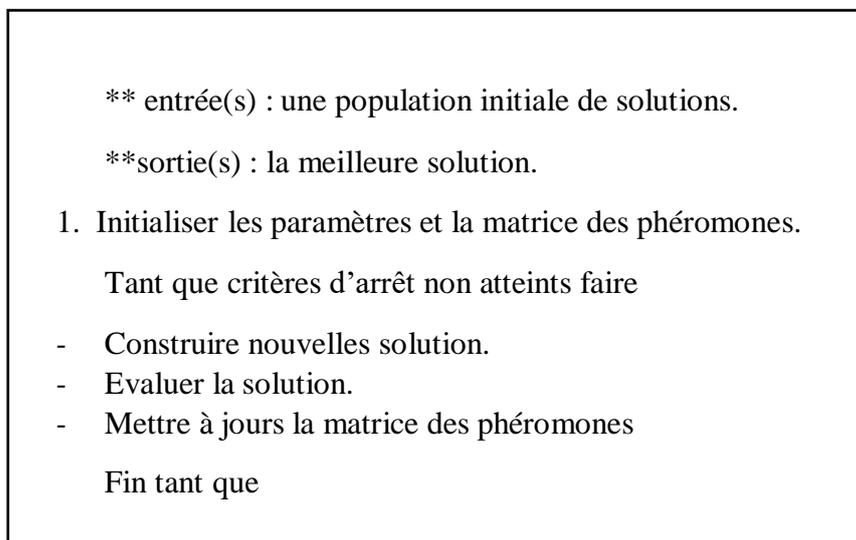


Figure 3.17: Optimisation du chemin par les fourmis au cours des itérations.

Algorithme 3.6: ACO.



L'ACO a été largement utilisée pour résoudre différents problèmes d'optimisation [50]. Elle est appréciée pour sa capacité à trouver rapidement des solutions de haute qualité dans des espaces de recherche complexes.

La principale caractéristique des algorithmes d'optimisation des colonies de fourmis réside dans la substance chimique qu'elles secrètent et laisse sur leurs chemins appelé 'phéromone'. Le degré de concentration de cette substance informe les fourmis sur les chemins pris par leurs prédécesseurs c'est-à-dire que plus la concentration des phéromones est élevée plus la distance du chemin est courte. Les caractéristiques clés de cet algorithme sont les suivantes [51]:

1. Choix du chemin : en se basant sur la concentration de phéromones.
2. Mise à jour des phéromones : ça concentration augmente au passage des fourmis.
3. Mécanisme de rétroaction positive : Les fourmis laissent plus de phéromones sur les chemins optimaux, attirant ainsi davantage de fourmis vers ces chemins. En revanche, les chemins moins optimaux perdent progressivement leurs phéromones en raison de l'évaporation. Ce processus conduit à la convergence de la colonie vers un chemin optimal unique.
4. Calcul parallèle distribué : Les fourmis effectuent des recherches parallèles dans l'espace des solutions en se basant sur la concentration de phéromones et d'autres facteurs heuristiques. Cela permet une implémentation efficace et adaptée au parallélisme.
5. Stagnation facile : L'algorithme peut être confronté à une stagnation, où toutes les fourmis se dirigent vers un chemin local optimal et ne poursuivent pas l'exploration de l'espace des solutions. Cependant, en ajustant dynamiquement les valeurs des phéromones, on peut éviter cette stagnation et résoudre les problèmes d'optimum local.

5. Hybridation de la métaheuristique ACO et MPR

La diffusion hybride MPR-ACO émerge comme une approche prometteuse pour améliorer l'efficacité de la diffusion dans les RCSFs. Cette approche combine deux techniques clés : le paradigme Multi Point Relay et l'algorithme Ant Colony Optimization.

Dans cette hybridation nous avons modifié le principe de l'algorithme ACO, afin de l'adapter à notre problématique qui est de maximiser la couverture du réseau, tout en minimisant le nombre de nœuds MPRs, pour ce faire, au lieu de calculer la distance entre les nœuds dans l'algorithme ACO, nous calculons le nombre d'arêtes entre un nœud et ses voisins. L'algorithme de colonies de fourmis est utilisé pour résoudre le problème de sélection de l'ensemble MPR minimal.

L'algorithme utilise des fourmis virtuelles qui explorent le graphe pour trouver les ensembles MPR minimums. Pendant leur parcours, ces fourmis déposent des phéromones sur les arêtes, permettant ainsi aux autres fourmis de suivre leurs chemins. Cette approche représente une alternative aux stratégies heuristiques gloutonnes classiques et peut conduire à des solutions améliorées pour le problème du minimum d'ensemble MPR. Dans notre étude, nous avons défini la fonction heuristique comme suite :

Fonction heuristique : C'est le nombre d'MPRs nécessaire pour faire la diffusion.

Notion de base

Définition 1: (Matrice d'adjacence) Une matrice d'adjacence A est une représentation sous forme d'une matrice qui indique la connectivité entre les sommets d'un graphe G d'ordre N . Chaque élément de la matrice indique s'il existe ou non une arête entre deux sommets.

$$\begin{cases} A_{ij} = 1 & i, j \text{ sont connectés} \\ A_{ij} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Définition 2: (voisinage) le voisinage d'un nœud est l'ensemble de tous les nœuds adjacents, deux nœuds sont dit adjacent s'il directement connecté par une arête, autrement dit les voisins d'un sommet $v \in V$, noté $N(v)$ définit comme $N(v) = \{u \in V | (u, v) \in E\}$

Définition 3: (chemin) le chemin entre deux nœuds, la longueur du chemin représente le nombre d'arêtes entre ces sommets.

Formalisation

Pour formaliser notre problématique, nous devons concevoir un graphe, et une formule qui calcul le nombre d'MPRs utilisés pour faire la diffusion.

Le RCSFs est modélisé par un graphe $G = (V, E)$.

$V = \text{Nodes}$, $\text{Nodes} = N_1, N_2, \dots, N_M$ l'ensemble des nœuds dans le réseau.

$E = \{E_{i,j} / (V_i, V_j) \in V\}$ est l'ensemble des arêtes du graphe.

Il est indubitable que le principal objectif dans la recherche dans les RCSFs, est le fait de pouvoir minimisé et optimisé le nombre de relais, pour ce faire nous avons défini une fonction qui calcule le nombre d'MPRs nécessaire pour une diffusion, elle est définie comme suit :

$$f(E^s) = NB_MPRs(N_d, N_s) \quad 3.1$$

Où :

- E^s : c'est la liste des MPRs.
- N_d : c'est le nœud qui fait la diffusion.
- N_s : c'est l'ensemble des nœuds du 2nd voisinage de N_i .

Probabilité de transition

Une fourmi k est placée sur un nœud capteur à un instant t , et va effectuer un déplacement au nœud N_j . Le choix de la fourmi se fait de manière aléatoire, avec la loi de probabilité ci-dessous :

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[c_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}]}{\sum_{y \in N_i} [c_{iy}(t)]^\alpha \times [\eta_{iy}]} & \text{si } j \in N_i^k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad 3.2$$

Où :

- η_{ij} : c'est le facteur heuristique associé à un nœud, nous l'avons défini comme le nombre de voisins à deux sauts de N_i .
- α, β : sont des paramètres qui contrôlent l'importance relative entre phéromones et visibilité.
- N_i^k : les nœuds que la fourmi k n'a pas encore visités.

Mise à jour des phéromones

Une fois que chaque fourmi construit son chemin (liste d'MPRs), les valeurs des phéromones sont mises à jour durant l'exécution de l'algorithme ACO-MPR afin d'orienter les fourmis vers la bonne solution. Cela se fait en deux étapes : dépôt et évaporation.

Dépôt de phéromones

L'idée principale derrière le dépôt de phéromone est que les fourmis, en suivant les pistes de phéromones laissées par leurs congénères, peuvent communiquer et partager des informations sur les bonnes solutions qu'elles ont découvertes. Les composants de solution qui ont été fréquemment utilisés dans ces bonnes solutions sont considérés comme des candidats prometteurs pour de futures améliorations de la solution. Cela crée une rétroaction positive qui guide les fourmis vers les meilleures solutions dans les itérations suivantes. La forme générale s'exprime par cette expression :

$$r_{ij}(t + 1) = \sum_{k=1}^{n_{Ant}} \Delta r_{ij}^k(t) \quad 3.3$$

- nAnt : c'est le nombre de fourmis.
- Δr_{ij}^k : c'est la quantité de phéromone déposée sur l'ensemble du chemin. Elle est définie comme suite :

$$\Delta r_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\rho}{|L^k|} & \text{si } (i, j) \in L^k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec : ρ est une constante, et L^k listes des MPR sélectionné par la fourmi k .

Évaporation des phéromones

Cette étape vise à réduire les valeurs de phéromone présentes sur les chemins ou les composants de solution au fil du temps. L'introduction d'un processus d'évaporation des phéromones est nécessaire pour éviter que les fourmis ne restent piégées dans des solutions sous-optimales, également appelées minimums locaux. Lorsque les fourmis suivent les pistes de phéromones laissées par leurs congénères, elles peuvent être attirées par des chemins qui semblent prometteurs en raison d'une concentration élevée de phéromones, mais qui en réalité ne conduisent pas à une solution optimale.

$$r_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \times r_{ij} + \sum_{k=1}^{nAnt} \Delta r_{ij}^k \quad (3.5)$$

$\rho \in [0; 1]$ C'est un coefficient qui définit la vitesse d'évaporation des phéromones sur les liens entre t et $t+1$.

Sélection de la meilleure solution

Pour chaque itération une meilleure solution est construite selon la formule :

$$L^s = MIN (Nb_{MPR(L^k)}) \quad /k = 1, 2, \dots, nAnt \quad (3.6)$$

Codification de la solution

La codification d'une solution se fait sous forme d'un vecteur de nombres entiers, chaque élément de ce vecteur correspond à un nœud MPR. La solution maximise la couverture du réseau avec un minimum de nœuds relais. Dans la figure 3.18 le vecteur représente la codification de la solution (liste d'MPRs), nécessaire pour le nœud 2 d'effectuer la diffusion.

Le graphe est défini par une matrice d'adjacence défini comme suit :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

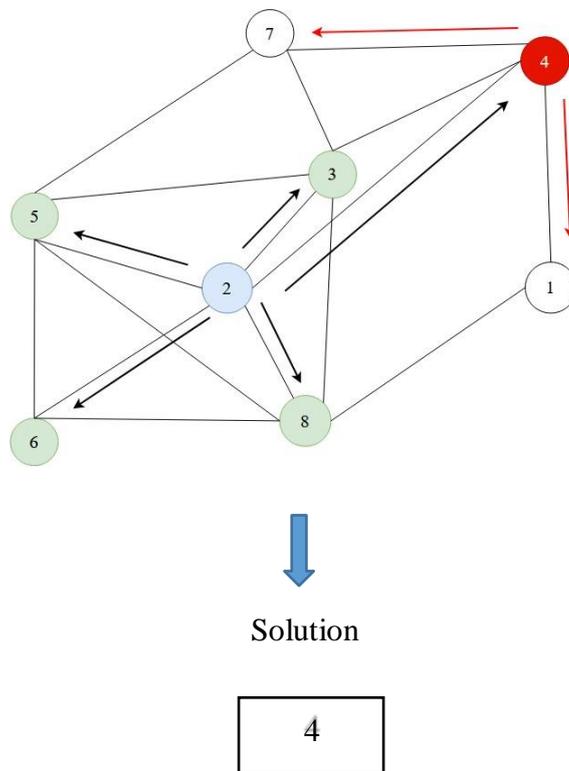


Figure 3.18: Représentation d'un réseau de capteurs sans fils.

D'après la figure 3.18, le nœud responsable de la diffusion est le nœud {2}. Cela signifie que ce nœud est chargé d'initier la diffusion de l'information dans le réseau. Ensuite, nous avons une liste de nœuds qui composent le premier voisinage du nœud responsable {3, 4, 5, 6, 8}. Le deuxième voisinage du nœud responsable est composé des nœuds {1, 7}. Enfin, le nœud MPR est identifié comme étant le nœud numéro {4}. Ce nœud spécifique joue un rôle clé dans la diffusion en tant que relais principal de l'information.

Algorithme de diffusion MPR-ACO

L'algorithme (3.7) illustre la méthode de diffusion MPR-ACO

Algorithme 3.7: MPR-ACO

**Entrées : N_s = Nombre de capteurs.

**Sorties : L_s = une liste avec un minimum d'MPRs

1. Création d'un réseau connecté.
2. Choisir d'une manière aléatoire un nœud M , M c'est le nœud qui lance la diffusion.
3. Obtenir les voisins du 1^{er} saut S_f et les voisins de deux sauts S_s pour M .
 - Si $S_s = \emptyset$, arreter le programme.
 - Sinon, commencer la sélection des MPRs.

4. Initialisation
 - taux de phéromone.
 - $length(L_s) = \text{inf}$.

5. Pour $it = 1 : \text{MaxIt}$ **faire**

Pour $k = 1 : nAnt$ **faire**

$$U_k = S_s$$

$$S_k = S_f$$

Choisir aléatoirement N_d dans S_f .

$$L_k = (N_d)$$

Tant que $U_k \neq \emptyset$

$i = \text{dernier}(L_k)$

Calculer la probabilité de transition $P_{ij}^k(t)$ $j \in S_k$ avec la formule (3.2)

$$L_k = L_k \cup \{Q\}, Q \in S_k$$

Calculer D , D est l'ensemble des nœuds couverts par le nœud Q .

$$U_k = U_k - (U_k \cap D)$$

End tant que

Si $length(L_k) < L_s$

$$L_s = L_k$$

Fin si

Calculer Δr_{ij}^k avec la formule (3.5)

Mettre à jour $r_{ij}^k(t)$ pour la solution construite par la fourmi k (L_k) avec la formule (3.3)

Fin pour

Fin pour

Organigramme de diffusion MPR-ACO

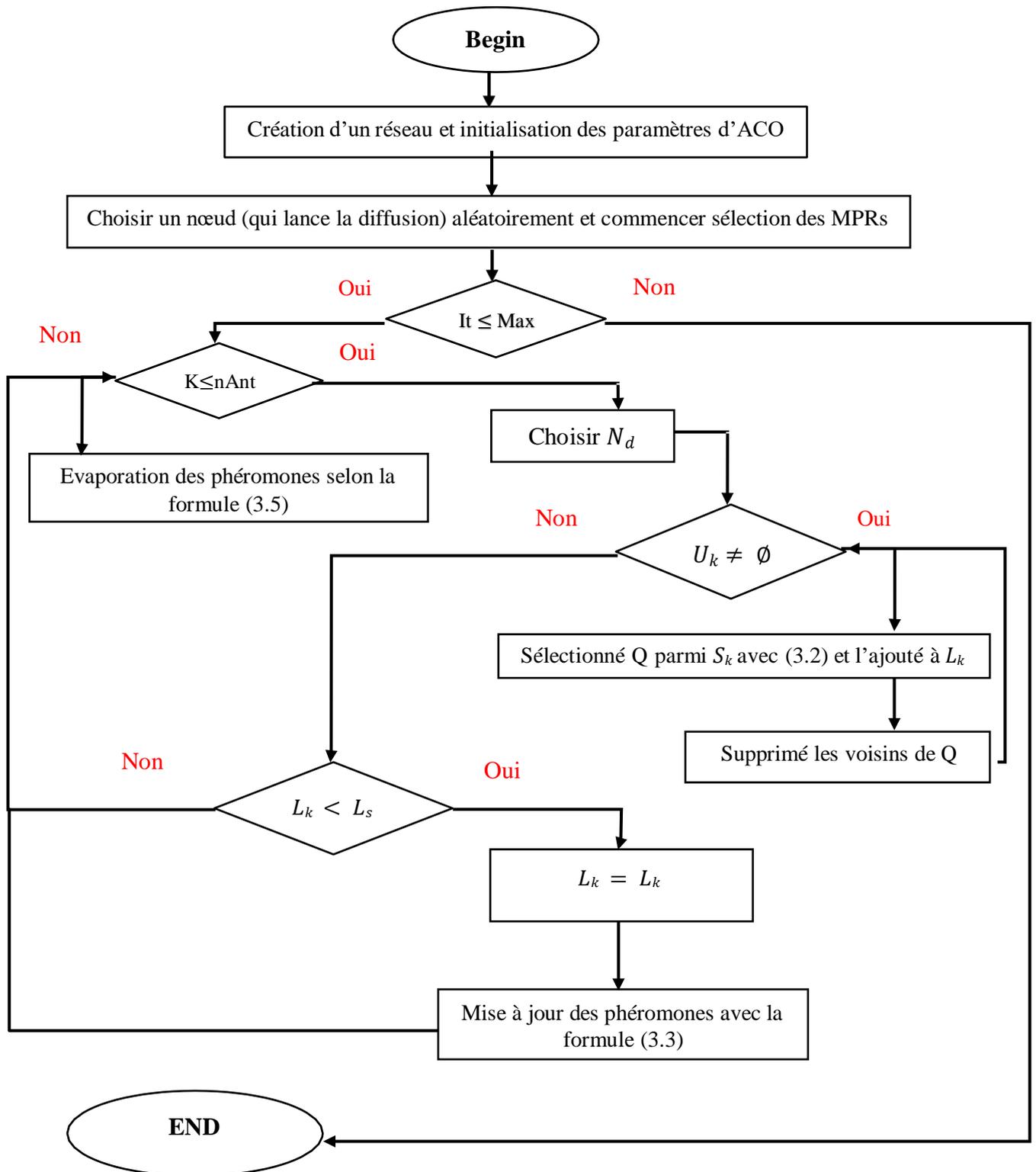


Figure 3.19: organigramme de diffusion MPR-ACO

Tableau 3.1: Paramètres de l'algorithme MPR-ACO.

L_k	Solution d'une fourmi k
S_k	1 ^{er} voisins pour la fourmi k
U_k	Nœud non-couvert par la fourmi k
L_s	Meilleure solution
N_d	Nœud responsable de la diffusion
S_f	Voisins du 1 ^{er} saut
S_s	Voisins du 2 nd saut

Fonctionnement de l'algorithme MPR-ACO

Dans cette partie, nous allons maintenant décrire les différentes phases de l'algorithme proposé, la première phase constitue une phase d'initialisation, suivis d'une phase de recherche des solutions, ensuite une phase de sélection de la meilleure solution, enfin la phase finale qui consiste à retourner la solution optimale du problème.

a. Phase 1 : Initialisation

- Création d'un réseau connecté.
- Choisir un nœud M aléatoirement pour faire la diffusion.
- Initialisation : Le taux de phéromone.

b. Phase 2 : Recherche des solutions

- Identification des premiers voisins S_f , et des seconds voisins S_s du nœud M .
- Si S_s est vide, le programme s'arrête.
- Sélection des MPRs.
- Pour chaque itération

Les fourmis choisissent d'une manière aléatoire le premier MPR.

Chaque fourmi construit une solution selon la probabilité de transition (3.2).

Les nœuds choisis comme MPR sont ajoutés à la liste L_k , et leurs voisins sont supprimés dans S_s .

- Mise à jour des taux de phéromones.

c. Phase finale : sélection de la meilleure solution.

- Mise à jour de la meilleure solution, Si la taille de la solution de la fourmi est inférieure à la longueur de la meilleure solution actuelle, alors cette liste est mise à jour.

- Une fois que toutes les fourmis ont terminé leurs constructions, la liste L_s contient la solution finale avec le nombre minimal d'MPRs.

6. Evaluation des performances de l'algorithme MPR-ACO

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'évaluation de l'algorithme proposé, effectués par le biais de simulations. Pour ce faire, nous commençons par décrire l'environnement de simulation, puis nous décrivons le corpus de données et les scénarios d'évaluation. Ensuite, nous abordons les métriques à prendre en compte pour l'évaluation, et enfin, nous présentons les résultats de simulation pour illustrer les avantages de l'algorithme proposé en termes du nombre d'MPRs et du taux de succès.

Environnement de simulation

Les essais ont été effectués sur une machine dotée d'un processeur Intel(R) Core(TM) i5-6300U CPU avec une fréquence de 2.40GHz / 2.50 GHz et une RAM de 8Go, exécutant Matlab R2019b sous système Windows 10 entreprise 64bits.

Les différents paramètres de notre simulation sont représentés dans le tableau 3. :

Tableau 3.2: Les paramètres de simulation.

Nombre de nœuds	6-100
Nombre totale d'itération	100
Nombre de fourmis	100
La constante ϱ	70
Degré d'évaporation de phéromones ρ	0.9
α, Q	1

Corpus de données et scénarios d'évaluation

Pour évaluer les performances de notre proposition, nous avons généré un réseau de capteurs sans fil aléatoire, et ainsi que le nœud responsable de la diffusion.

Métriques et méthodologie de simulation

Les performances de notre algorithme sont comparées à celle de l'algorithme MPR basique. Les métriques considérées pour l'évaluation sont :

- **Le nombre d'MPRs** : c'est le nombre minimum d'MPRs sélectionnés par l'algorithme pour faire la diffusion.
- **Le taux de succès** : il représente le pourcentage du nombre de diffusion effectué sur le nombre de diffusion totale.

Résultats de simulation

Cette partie illustre une comparaison du nombre d'MPRs total obtenus avec deux approches (MPR et MPR-ACO). Le nombre de points de relais et mesurer en fonction de la taille du réseau, nous avons effectué différents tests et simulations pour les deux approches en faisant varier le nombre de nœuds (6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 33, 35, 45, 50). Toutes les mesures des simulations représentent les résultats la moyenne prise de 30 exécutions successives.

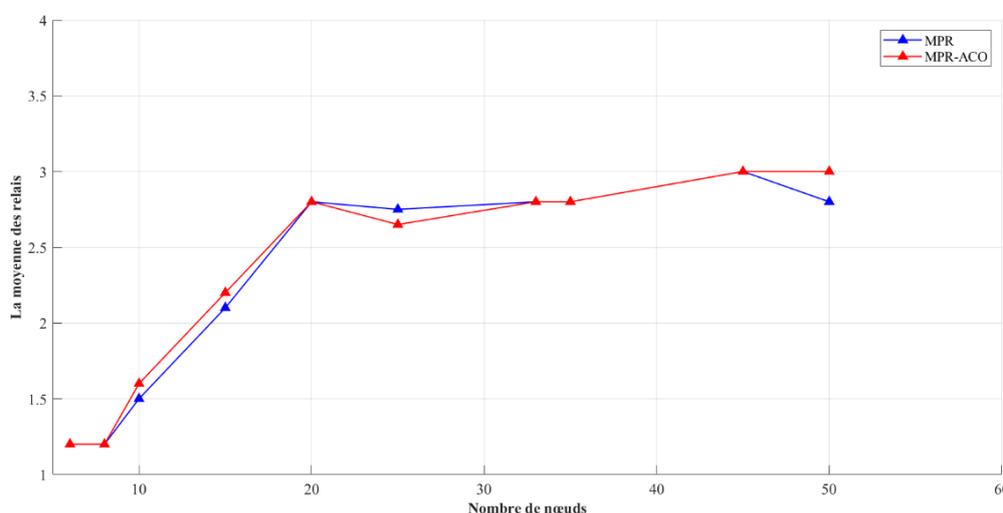


Figure 3.20: Nombre moyen de relais effectués pour la diffusion pour les deux approches MPR et MPR-ACO.

La figure 3.20 montre que le nombre d'MPRs augmentent, avec l'augmentation de la taille du réseau, pour les deux approches. Nous constatons aussi que le nombre d'MPRs obtenus avec la méthode MPR-ACO est proche des résultats des simulations MPR dans certains cas et identique dans d'autres cas. Cela suggère que la méthode MPR-ACO génère des résultats comparables à ceux de la méthode MPR classique, malgré son caractère aléatoire.

L'analyse souligne que la recherche de plus d'arêtes pour les MPRs augmente le délai, car il est nécessaire de parcourir tous les nœuds un par un. Cela implique une complexité temporelle plus élevée dans la sélection des nœuds MPR avec la méthode MPR classique. En revanche, la méthode MPR-ACO utilise une approche aléatoire grâce à l'algorithme ACO. Cette

approche peut potentiellement réduire le délai en évitant de parcourir tous les nœuds de manière séquentielle, offrant ainsi une alternative plus efficace.

Taux de succès

Cette partie illustre une comparaison du taux de succès entre les deux approches. Le taux de succès est mesuré en fonction de nœuds défaillants dans notre réseau, nous avons effectué différents tests pour les deux approches en faisant varier le pourcentage de nœuds défaillants (20%, 30%, 40%, 50%).

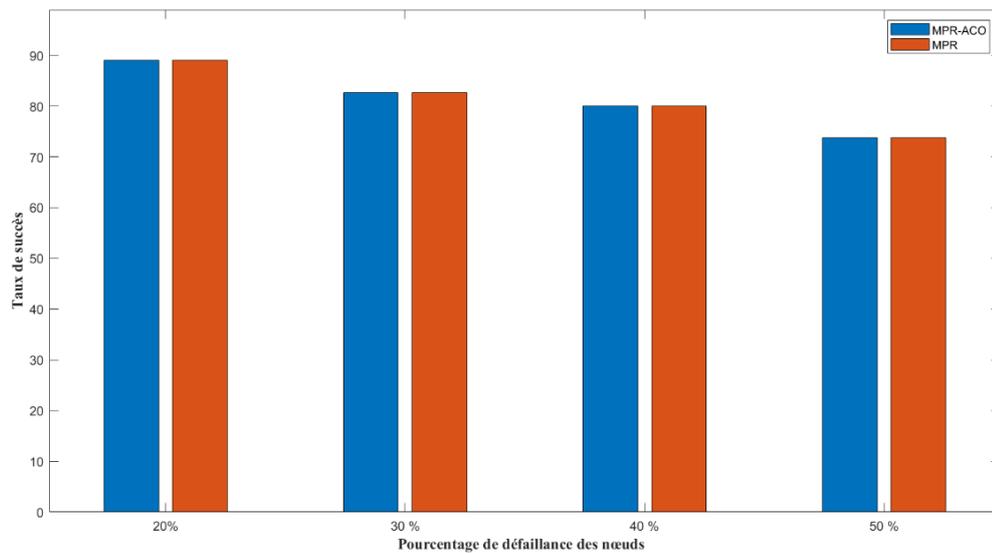


Figure 3. 21: Taux de défaillance avec 30 nœuds

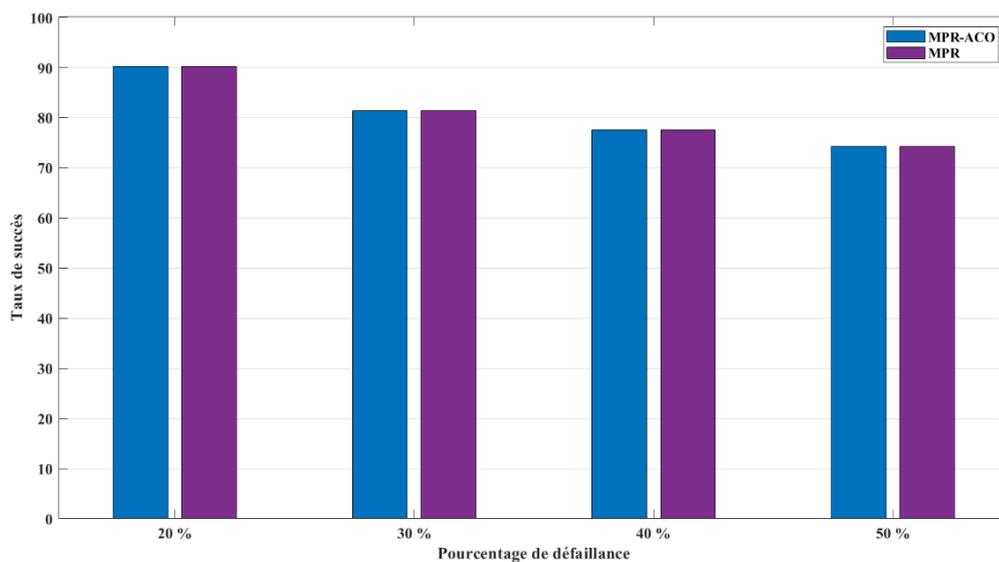


Figure 3.22: Taux de défaillance pour 50 nœuds.

D'après les figure 3.21 et 3.22, Nous remarquons que les deux taux de succès pour MPR et MPR-ACO sont identiques, ce qui indique que l'approche ACO-MPR peut fournir des résultats comparables à ceux de l'approche MPR classique en termes de diffusion des messages, nous constatons aussi une tendance commune : à mesure que le nombre de nœuds défaillants augmente, le taux de succès de la diffusion diminue pour les deux méthodes. Cela signifie que lorsque le réseau de capteurs rencontre un plus grand nombre de nœuds défaillants, la capacité des méthodes de diffusion à atteindre tous les nœuds est réduite.

7. Synthèse

En résumé, nos résultats de simulation ont montré que l'approche ACO-MPR et l'approche MPR présentent des performances similaires en termes de taux de succès et de nombre d'MPRs nécessaires pour couvrir le réseau. Les deux méthodes ont démontré leur efficacité dans la diffusion des messages dans le réseau de capteurs sans fil. L'avantage clé de l'approche ACO-MPR est son utilisation de l'algorithme ACO pour sélectionner les prochains nœuds responsables de la diffusion. Cette approche basée sur des probabilités permet de réduire le nombre de messages nécessaires dans le système, améliorant ainsi l'efficacité globale de la diffusion

En conclusion, l'analyse met en évidence que la méthode MPR-ACO, bien qu'aléatoire dans la sélection des nœuds responsables de la diffusion, produit des résultats similaires à ceux de la méthode MPR classique. De plus, grâce à l'approche aléatoire de l'ACO, il est possible de réduire le délai de diffusion par rapport à la méthode classique qui nécessite un parcours séquentiel de tous les nœuds. Cependant, d'autres facteurs tels que la performance globale du réseau et l'efficacité énergétique doivent également être pris en compte pour une évaluation complète de cette méthode.

8. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons étudié en détail la métaheuristique ACO et son application dans la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire. Nous avons constaté que cette méthode retourne de bonnes performances et a été largement adoptée par la communauté scientifique. L'utilisation des phéromones dans ACO permet d'exploiter l'expérience de recherche des fourmis, ce qui renforce l'apprentissage et facilite la construction de solutions efficaces dans les réseaux.

Dans le contexte spécifique des RCSFs, nous avons présenté notre contribution qui consiste à adapter la métaheuristique ACO à la diffusion de données avec la méthode MPR. Nous avons opté pour une approche décentralisée, afin de tirer parti des avantages de l'ACO tout en répondant aux contraintes des RCSFs. Cette adaptation a permis d'exploiter les phéromones pour guider la diffusion des données de manière efficace et optimale.

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil ont révolutionné notre interaction avec le monde en nous permettant d'obtenir des informations en temps réel et de prendre des décisions éclairées grâce à des données précises et fiables. Dans ce contexte de progrès technologique, les RCSFs jouent un rôle essentiel en facilitant la collecte, la transmission et l'exploitation des données, ce qui ouvre la voie à de nouvelles opportunités et à des défis stimulants pour les chercheurs et les ingénieurs.

Dans les réseaux de capteurs sans fil, l'un des défis majeurs consiste à optimiser la diffusion des données collectées par les capteurs. La diffusion efficace des données est cruciale pour assurer une transmission rapide et fiable des informations au sein du réseau. Cela permet aux nœuds capteurs de partager leurs mesures avec d'autres nœuds du réseau et de faire parvenir les données aux points d'accès ou aux nœuds centraux. L'optimisation de la diffusion dans les RCSFs vise à maximiser l'efficacité énergétique, à minimiser les retards de transmission, à garantir une couverture étendue et à assurer la fiabilité des données transmises. Cependant, cette optimisation représente un défi complexe en raison des contraintes inhérentes aux RCSFs, telles que la limitation des ressources.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les réseaux de capteurs sans fil, en définissant leurs composants, leurs caractéristiques, leurs classifications, leurs architectures et les différents domaines d'utilisations. Le deuxième chapitre a introduit le concept de diffusion dans les RCSFs, suivi d'une étude approfondie des différentes techniques de diffusion ainsi que des algorithmes associés. Dans le troisième chapitre, nous avons présentés notre contribution en proposant un nouvel algorithme de diffusion et en évaluant ses performances par le biais de simulations. Notre approche vise à résoudre le problème de couverture réseau, en adaptant l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis ACO à notre méthode de diffusion basée sur les relais MPR. Cette proposition est conçue pour assurer une couverture complète de notre réseau tout en réduisant le nombre de points relais nécessaires.

En somme, la méthode MPR-ACO présente des résultats prometteurs et offre des possibilités d'amélioration de la diffusion des transmissions dans les réseaux de capteurs sans fil. Son potentiel de réduction du délai en évitant le parcours séquentiel des nœuds est un avantage majeur. Nous encourageons donc la poursuite des recherches et des évaluations approfondies de la méthode MPR-ACO pour une meilleure compréhension de ses performances et de ses avantages dans divers scénarios de réseaux de capteurs sans fil.

Références
Bibliographiques

Références

- [1] Akyildiz, I. F, Su, W, Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), 393-422, 2002.
- [2] Akkaya, K., & Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3), 325-349, 2005.
- [3] Cédric Ramassamy, *Analyse des protocoles des Réseaux de capteurs sans-fil*. Thèse de doctorat, université des Antilles et de la Guyane, 2012.
- [4] Tarek. Moulahi, *Algorithmes de Diffusion dans les Réseaux de Capteurs à topologie Dynamique*. Thèse de doctorat, université de Sfax (2015).
- [5] A. Boudries, *Maintien de la Connectivité dans les Réseaux Ad Hoc sans fil*. Thèse de doctorat, université de Ferhat Abbas de Sétif 1, 2014.
- [6] Jacob Farden, *Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs and Applications*. Fifth Edition- Springer International Publishing Switzerland (2016).
- [7] J. Lester Hill, "System Architecture for Wireless Sensor Networks". University of California, Berkeley, Spring 2003.
- [8] R.KACIMI. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*, thèse de doctorat, université de Toulouse, France, Juillet, 2009.
- [9] Karl, H., & Willig, A. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 2007.
- [10] F. Ingelrest. *Protocoles localisés de diffusion et économie d'énergie dans les réseaux ad hoc et de capteurs*. *Thèse doctorat, Université des sciences et technologies de Lille*, 2006.
- [11] Al-Khatib & Baicher. *Wireless Sensor Network Architecture*. Conference on Computer Networks and Communication Systems (ICNCS 2012).
- [12] Kamaldeep Kaur, Parneet Kaur, Er. Sharanjit Singh. *Wireless Sensor Network: Architecture, Design Issues and Applications*. *International Journal of Scientific Engineering and Research*. 2014
- [13] Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292-2330, 2008.
- [14] Boubiche Djallel Eddine. *Une approche Inter-Couches (cross-layer) pour la Sécurité dans les RCSF*". Thèse de doctorat, université de Batna.(2013).
- [15] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. Wiley-Interscience, 2007.
- [16] Akyildiz, I. F, Su, W, Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102-116, 2002.

- [17] ARAMPATZIS, T., LYGEROS, J., AND MANESIS, S. A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks. In *Intelligent Control. Proceedings of the 2005 International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation (2005)*, IEEE, pp. 719–724., 2005.
- [18] Shuang-Hua Yang. *Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications*, Springer, (2014).
- [19] *Introduction to Graph Theory*. Douglas B. West, 2nd Edition, Université of Illinois-Urbana, Pearson Education (Singapore), 2002.
- [20] Jeffrey E. Wieselthier, Gam D. Nguyen and Anthony Ephremides, On the Construction of Energy-Efficient Broadcast and Multicast Trees in Wireless Networks, *IEEE INFOCOM 2000*, pp.585-594 (2000).
- [21] ZhuoLiu, Bingwen Wang and Lejiang Guo. A Survey on Connected Dominating Set Construction Algorithm Wireless Sensor Networks. *Information Technology Journal*, 9pp.1081-109 (2010).
- [22] Römer, K., &Mattern, F. The design space of wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, 11(6), 54-61, 2004.
- [23] S. Vijayasharmila, Dr. P. Ganesh Kumar, S, Kalmalesh. A Survey on Connected Dominating set (CDS) both in the wireless sensor networks and wireless ad hoc networks. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* (2015).
- [24] Jing S. He. “Connected Dominating Set Based Topology Control in Wireless Sensor Network”, Georgia State University (2012) DOI : <https://doi.org/10.57709/2850379>
- [25] S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen, and J. Sheu. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *Proc.of ACM/IEEE MOBICOM'99*, pages 151–162, Aug. 1999.
- [26] Qayyum, A., Viennot, L., & Laouti, A. Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks. In *Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2002. HICSS., Hawaii, USA, pp. 3866-3875. (2002, January).
- [27] Adjih, C., Jaquet, P., and Viennot. L., (2005). "Computing Connected Dominated Sets with Multi-point Relays", *International Journal Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, vol.1.no.1-2, pp. 27-39.
- [28] Liang, O., Sekercioglu, Y. A., & Mani, N. A survey of multipoint relay based broadcast schemes in wireless ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 8(1-4), pp. 30-46. (2006).
- [29] Wan, P.-J., Alzoubi, K. M., & Frieder, O. Distributed construction of connected dominating set in wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, Vol. 3, pp. 1597-1604. (2002).
- [30] Naixue Xingo, Xingo Huang, Hongju Chen and Zheng Wan. Energy-Efficient Algorithm for Broadcasting in Ad Hoc Wireless Sensor Networks - sensors-13-04922.pdf (2013)

- [31] D. Lisiecki, P. Zhang and O. Theel. A Connected Dominating Set-Based Flooding Protocol for Wireless Sensor Networks (2019).
- [32] Abbasi, A. A., & Younis, M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer communications*, 30(14), pp. 2826-2841. (2007).
- [33] Amandeep Kumar, Balwinder S D, Dmanpreet S. Energy Efficient Clustering Protocols For Wireless Sensor Networks : A Review, Department of Computer Science and Engineering, IKG Punjab Technical University, Jalandhar, India; (2021).
- [34] S. Lindsey, C. Raghavendra, "PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems," in: *Proceedings of 2002 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, vol.3*, pp.1125-1130, March 2002.
- [35] Boyinbode, O. Hanh Le; Mbogho, A.; Takizawa, M.; Poliah, R. A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks, 2010 13th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS), Takayama, Japan, pp (2010). 358-364.
- [36] Amandeep Kaur, Amit Grover. LEACH and Extended LEACH Protocols in Wireless Sensor Network-A Survey. *International Journal of Computer Applications (0975-8887)* Volume 116 – No. 10, April 2015
- [37] Wu, J., Lou, W., & Dai, F. Extended multipoint relays to determine connected dominating sets in MANETs, *IEEE Transactions on Computers*, 55(3), pp. 334-347. (2006).
- [38] J. Wu, "An Enhanced Approach to Determine a Small Forward Node Set Based on Multipoint Relay," *Proc. IEEE Semi-Ann. Vehicular Technology Conf. Fall (VTC)*, Sept. (2003).
- [39] Ye, F., Luo, H., Cheng, J., Lu, S., and Zhang, L. A Two-Tier Data Dissemination Model for Large-scale Wireless Sensor Networks, *ACM International Conference On Mobile Computing and Networking (Mobicom 2002)*. New York, USA, pp. 148-159. (2002).
- [40] Tarek Moulahi, Ahmed Almuhrat and Lamri Laouamer. Fault-Tolerant Energy-Efficient Tree In Dynamic WSNs. *International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing (IJASUC)* Vol.4, No.2, April 2013.
- [41] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. *Introduction aux algorithmes*, Deuxième édition. MIT Press et McGraw-Hill. ISBN 0-262-03293-7. Section 23.2: Les algorithmes de Kruskal et Prim, pp.567-574. Page d'édition italienne. 480 p. 490. (2001).
- [42] H.Jamal Abdul Nasir, Ku Ruhana Ku-Mahamud and Eiji Kamioka. Ant Colony Optimization Approaches in Wireless Sensor. *Journal of Computer Science* · June 2017
- [43] Talbi, E.-G. *Metaheuristics : from Design to Implementation*, vol. 74. John Wiley & Sons. (2009)
- [44] Zhang H, Wang Ch, Chen H, et al. Research on MPR selection algorithm based on optimal subset [J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*,34(2):156-159. (2015)

- [45] Zhang X, Zeng Y, Gan G, et al. Finding the minimum MPR Set in OLSR protocol with genetic algorithms [J]. *Journal of Software*, 17(4):932-938. (2006)
- [46] Dong S. & Zhang, H. An MPR Set Selection Algorithm Based on Set Operation. *IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. 2021.
- [47] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni. Ant system : optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1) :29-41, 1996.
- [48] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni. The ant system : An autocatalytic optimizing process. 1991
- [49] M.Dorigo, A.Colonie, V.Maniezzo. Ant System : An Autocatalytic Optimizing Process Technical Report 91-016 (1999).
- [50] Xianming ZHAO, Huazhu SONG, Hongxia XIA, Luo ZHONG. Using Ant Colony Algorithm for Solving Minimum MPR Set and OPNET Simulation. *The 1st International Conference on Information Science and Engineering (ICISE2009)*.
- [51] LV, I. An Improved Ant Colony Algorithm in Wireless Sensor Network Routing. *International Journal Of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, 13(05), pp. 174-187 (2017).

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) proposent une approche novatrice pour la collecte et la diffusion d'informations provenant de divers environnements, ouvrant la voie à de nombreuses applications. Un RCSF est constitué de plusieurs capteurs répartis dans une zone géographique, chacun doté de capacités de communication sans fil et de capacités de traitement du signal pour la mise en réseau des données. Le mémoire explore différentes méthodes de diffusion pour améliorer les performances de communication de ces réseaux. L'une des approches étudiées est l'utilisation du relai MPR (Multipoint Relay) pour sélectionner intelligemment les capteurs chargé de retransmettre les informations vers tout le réseau.

Ce manuscrit est divisé en deux parties, la première se concentre sur l'état de l'art des différentes techniques de diffusion dans les RCSFs et leur taxonomie, tandis que dans la deuxième partie, nous avons présentés notre contribution qui est la diffusion MPR-ACO (MultiPoint Relay - Ant Colony Optimization), conçue pour optimiser la sélection des points relais, en minimisant leurs nombres, tout en maintenant la couverture du réseau.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil; Diffusion; Relai MPR; Algorithme ACO.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) offer an innovative approach to collecting and disseminating information from various environments, paving the way for numerous applications. A WSN consists of multiple sensors distributed geographically, each equipped with wireless communication capabilities and signal processing capabilities for networking the data. The thesis explores different dissemination methods to improve the communication performance of these networks. One of the investigated approaches is the utilization of Multipoint Relay (MPR) to intelligently select sensors responsible for relaying information throughout the network.

The manuscript is divided into two parts: the first focuses on the state-of-the-art of various dissemination techniques in WSNs and their taxonomy, while the second part presents our contribution, which is the MPR-ACO (MultiPoint Relay - Ant Colony Optimization) dissemination technique. This technique is designed to optimize the selection of relay points by minimizing their quantity while maintaining network coverage.

Keywords: Wireless Sensor Networks; Diffusion; MPR Relay; ACO Algorithm.