



HAL
open science

Collecte de données grâce aux réseaux de drones

Celia Yasmine Tazibt

► **To cite this version:**

Celia Yasmine Tazibt. Collecte de données grâce aux réseaux de drones. Automatique. Université Paris-Nord - Paris XIII; Université Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou, Algérie), 2021. Français. NNT : 2021PA131096 . tel-03920392

HAL Id: tel-03920392

<https://theses.hal.science/tel-03920392>

Submitted on 3 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PARIS XIII - SORBONNE PARIS NORD
École Doctorale Sciences, Technologies, Santé Galilée

Collecte de données grâce aux réseaux de drones

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par

Celia Yasmine TAZIBT épouse. OUBABAS

L2TI

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN INGENIERIE INFORMATIQUE

soutenue le 15/12/2021 devant le jury d'examen composé de :

DAOUI Mehammed, UMMTO Président du jury
BOUZEFRANE Samia, CNAM PARIS Rapportrice
MOUNGLA Hassine, Université de Paris Rapporteur
BOUSSETTA Khaled, Sorbonne Paris Nord Examineur
ACHIR Nadjib, Sorbonne Paris Nord Directeur de thèse
DJAMAH Tounsia, UMMTO Co-directrice de thèse

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Traitement et Transport de l'Information (L2TI) de l'Université Sorbonne Paris Nord et du laboratoire de recherche en informatique (LARI) de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou-Algérie.

Je tiens à remercier Monsieur ACHIR Nadjib, Maître de conférences à l'Université Sorbonne Paris Nord, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Je lui suis reconnaissante de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité certaine que je n'oublierai jamais. Cette thèse n'aurait pas pu être accomplie sans son appui incondtionnel.

J'adresse de chaleureux remerciements à ma directrice de thèse Madame DJAMAH Tounsia, Professeure à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou-Algérie, pour la mise à ma disposition des moyens de réussite de ce travail.

Je tiens, aussi, à remercier les membres du jury qui ont accepté et pris de leur temps afin de lire et d'évaluer mon travail.

Par ailleurs, j'adresse aussi mes remerciements à l'équipe du laboratoire de recherche L2TI qui m'ont accueilli durant ma période de stage, j'avoue que j'y ai passé des moments très riches en expériences.

J'exprime ma gratitude a mes amies Célia, Sarah, Lynda, Karima, Sadia et Kahina pour leur soutien tout au long de cette thèse. Nous avons partagé de bons moments.

Enfin, je ne pourrais finir ces remerciements sans penser à ma famille dont l'affection, l'amour, le soutien incondtionnel et l'encouragement constants m'ont été d'un grand réconfort et ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Je remercie donc mes chers parents qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui, mon cher époux qui me soutient dans tout ce que j'entreprends, mon petit prince AYLAN, mon frère ainsi que ma belle-famille. Ils m'ont permis d'effectuer mes recherches dans les meilleures conditions possibles, je tiens à leur rendre un grand hommage.

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	Contexte et motivations	9
1.2	Contributions	11
1.3	Structure de la thèse	13
2	WSN et Collecte de données	15
2.1	Introduction	15
2.2	WSN statiques	15
2.2.1	Définition et Composition d'un WSN	15
2.2.2	Architecture d'un noeud capteur	16
2.2.3	Caractéristiques et Contraintes des WSN	18
2.2.4	Domaine d'utilisation des WSN	19
2.2.5	Consommation énergétique dans les WSN	21
2.2.6	Méthodes d'optimisation de la consommation d'énergie dans les WSNs	23
2.2.7	Types de WSN	25
2.3	Collecte de données dans les réseaux de capteurs	29
2.3.1	Collecte de données classiques	29
2.3.2	Collecte de données mobile	32
2.4	Collecte de données grâce aux UAV	36
2.4.1	Fonctionnalités et défis	36
2.4.2	Planification de trajectoire	38
2.4.3	Conclusion	44
3	Méthode de clustering pour la collecte de données basées sur des UAVs	46

3.1	Introduction	46
3.2	Formulation du problème	47
3.2.1	Formation des clusters	49
3.2.2	Modèle de consommation Énergétique	50
3.2.3	Plannification de trajectoire du drone	53
3.3	Tests et Résultats	53
3.4	Conclusion	56
4	Méthode basée sur les champs potentiels artificiels pour la collecte de données	58
4.1	Introduction	58
4.2	Motivation	59
4.3	État de l’art	59
4.4	Définition du problème	61
4.5	Fonctions Potentielles :	63
4.6	Tests et Résultats	65
4.7	Conclusion	70
5	Stratégies dynamiques pour la collecte de données	72
5.1	Introduction	72
5.2	Motivation	74
5.3	Formulation du problème	75
5.3.1	Présentation du système	75
5.3.2	Modèle de consommation d’énergie pour les capteurs sans fil	76
5.3.3	Modèle de communication et protocoles	77
5.4	Stratégies de collecte de données	78
5.4.1	Data-driven Gathering Strategy – DDG	79
5.4.2	Time-driven Gathering Strategy – TDG	82
5.5	Évaluation des performances	83
5.5.1	Paramètres de simulation	84
5.5.2	Résultats	87
5.6	Conclusion	92
6	Conclusion	94
6.1	Synthèse	94
6.2	Apports de la thèse	95

6.3 Perspectives	96
----------------------------	----

Table des figures

2.1	Architecture d'un WSN	16
2.2	Architecture d'un noeud capteur	17
2.3	Domaines d'application des WSN	20
2.4	Types de WSN [1]	25
2.5	Routage Plat	30
2.6	Diffusion Classique VS Diffusion MPR [2]	30
2.7	Routage hiérarchique	32
2.8	Sink mobile	33
2.9	Relais mobile	34
3.1	Circuit du drone vs nombre minimum de sauts "h	55
3.2	Consommation d'énergie du drone VS consommation d'énergie des noeuds capteurs Vs nombre maximum de sauts (h)	57
4.1	Représentation de la division du champs de capture en cellules hexagonales	66
4.2	Temps Vs Quantité de données	67
4.3	Distance Vs Quantité de données	68
4.4	Histogramme de comparaison entre les différentes distances parcourues par le drone pour collecter différentes quantités de données	69
4.5	Nombre de noeuds capteurs vs distance parcourue	70
5.1	Présentation du système.	76
5.2	Format du paquet Hello pour la strategie DDG	81
5.3	Formatdu paquet TC pour la strategie DDG	81
5.4	Format du paquet HELLO pour la strategie TDG	83
5.5	Format du paquet TC pour la strategie TDG	84
5.6	Vitesse de collecte de données	87

5.7	Quantité de données récoltées par distance parcourue	89
5.8	Quantité de données récoltée VS nombre de noeuds capteurs	90
5.9	Quantité de données Valides collectées VS nombre de noeuds capteurs .	91
5.10	Quantité de données valides collectée VS fréquences de capture	92
5.11	Consommation d'énergie des noeuds capteurs	93

Liste des tableaux

2.1	Comparaison des schémas de collecte de données	45
3.1	Caractéristiques des capteurs CC2420	53
3.2	Caractéristiques du DJI Phantom3 Standard Advanced	54
4.1	Caractéristiques du CC2420	67
5.1	Consommation électrique de l'émetteur/récepteur du nœud.	77
5.2	Paramètres de simulation.	85

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte et motivations

Au cours de ces dernières années, les avancées technologiques dans le domaine des communications sans fil ont permis le développement de capteurs qui sont caractérisés par un faible coût de production, une faible consommation énergétique ainsi qu'une grande flexibilité. Ils sont inter-connectés entre eux pour former des réseaux de capteurs sans fil qui peuvent être déployés dans une zone d'intérêt afin de palier à des besoins spécifiques dans différents domaines allant de la surveillance [42, 44, 54] (exp. Pollution, agriculture, structures et bâtiments) à la détection d'événements [100, 92] (exp. intrusions, incendies et inondations) en passant par le suivi des cibles [90, 8]. En règle générale, un grand nombre de petits périphériques (nœuds) composent un réseau de capteurs ou Wireless Sensor Network (WSN) en anglais. Les nœuds sont considérés comme des ressources limitées, c'est-à-dire avec une mémoire embarquée limitée, des émetteurs-récepteurs radio à courte portée et une alimentation par batterie. Ces appareils exécutent trois tâches de base : (i) échantillonner une quantité physique de l'environnement (ii) traiter (et éventuellement stocker) les données acquises, et (iii) les transférer via des communications sans fil vers un point de collecte de données appelé nœud collecteur, station de base ou *sink*. Ces nœuds sans fil peuvent être disséminés sur une zone de détection distante, par exemple, des zones auxquelles les humains n'ont pas accès. La collecte des données devient, dans ce cas, l'un des problèmes majeurs et présente de nouveaux défis.

Dans la plupart des travaux de recherche les nœuds capteurs sont statiques et les données captées sont transmises à travers le réseau vers un nœud appelé station de base

ou sink grâce à des communications sans fil multi-sauts. Ces dernières sont appelées "converge cast" ou en d'autres termes communications de plusieurs vers un (many-to-one). Dans ce cas, il est nécessaire de mettre en place un protocole de routage des données. Ce dernier, prendra en charge les multiples transmissions pour acheminer les paquets vers les nœuds destinataires. Cette tâche est compliquée à cause de la nature dynamique de la topologie du réseau. En effet, lorsqu'un nœud capteur vient à épuiser ses réserves énergétiques ou être détérioré par les conditions environnementales, ce dernier devient injoignable, ce qui peut amener à une perte de connectivité dans le réseau.

De nombreuses solutions de routage pour les réseaux de capteurs sans fil utilisent des noeuds sink statiques pour la collecte des données [66] [77]. Dans ce type d'approches, les nœuds capteurs se trouvant à proximité du sink sont sujets à un trafic élevé. En effet, ils sont plus sollicités que les autres noeuds du réseau et consomment plus d'énergie que les autres, car ils prennent en charge la retransmission des paquets de ces derniers vers le sink.

Afin de palier à ce problème, des études plus récentes ont envisagé l'utilisation d'un noeud sink mobile pour la collecte de données dans les réseaux de capteurs sans fil [110] [39]. Dans un premier temps, les chercheurs ont considéré une collecte de données au sol. Pour ce faire, les noeuds puits étaient placés sur des robots [125], parfois confiés à des personnes et même fixés sur des animaux[51]. Plus récemment, grâce au développement de nouveaux équipements volants à faible coût (également appelés drones ou UAV) , les chercheurs ont envisagé de les utiliser pour aider à collecter des données dans les réseaux de capteurs sans fil [80]. Ce type de WSN fait partie de la famille des réseaux de capteurs sans fil mobiles.

L'introduction de la mobilité dans les WSNs apporte beaucoup d'améliorations mais aussi beaucoup de défis. En effet, cette méthode aide à réduire non seulement les délais de transmission et de communication dans l'ensemble du réseau, mais diminue également la consommation énergétique des nœuds situés à proximité des sink, ce qui prolonge la durée de vie du réseau. Bien que l'utilisation des sink mobiles aient beaucoup d'avantages, il reste encore des problèmes difficiles à résoudre tels que la topologie dynamique du réseau ainsi que la fiabilité. L'un des défis les plus importants de la collecte de données dans les WSN avec sink mobile est la planification de la trajectoire de ces sink [22].

Ce travail consiste à proposer des algorithmes de planification de trajectoires des drones pour la collecte de données dans les WSN. Ces derniers visent à récolter le

maximum de données dans le réseau. Par ailleurs, l'autonomie limitée des batteries des drones civils actuels renforce la nécessité de minimiser la consommation énergétique de ces derniers.

En résumé, nous avons fixé comme objectif de proposer des solutions qui :

- maximisent la quantité de données récoltées.
- maximisent la durée de vie du WSN
- minimisent la consommation énergétique du drone

1.2 Contributions

La collecte de données est l'une des fonctions les plus importantes des WSNs. Pour palier aux problèmes de la collecte de données classique, l'utilisation d'un nœud sink mobile a récemment fait son apparition. Il existe 3 types de mobilité du sink. La mobilité aléatoire : le sink se déplace de manière à l'intérieur du champs de capture, mobilité prédéfinie : approche statique où le sink suit un chemin calculé d'avance et la mobilité non prédéfinie : approche dynamique dans laquelle le sink découvre son chemin au cours du processus de collecte des données.

Afin de fournir le meilleur compromis entre les exigences de l'utilisateur final et les contraintes du réseau, nous apportons des réponses aux questions suivantes tout au long de nos contributions :

1. Comment minimiser la consommation d'énergie de l'ensemble du réseau ?
2. Comment collecter efficacement les données sensorielles ?
3. Comment réaliser cette tâche avec une utilisation optimale des ressources du WSN ?

Notre première contribution est une solution statique. Une première approche consiste à survoler tous les capteurs de manière optimisée pour récupérer les données captées (le plus court chemin). L'avantage de cette dernière est qu'elle présente un coût énergétique réduit pour le réseau. En effet, aucun protocole de routage n'est requis. Cependant, le drone devra parcourir de longues distances, ce qui représente un inconvénient. La longueur du chemin parcouru par le drone devra donc être réduite. La deuxième approche consiste à choisir un capteur spécifique en tant que puits et tous les capteurs doivent envoyer leurs données à ce puits. Ainsi, le drone peut récupérer toutes les données d'un nœud spécifique. Malheureusement, même si cette approche préserve l'énergie du drone

en réduisant fortement son temps de vol, elle peut augmenter la consommation d'énergie du réseau. En effet, les données doivent être acheminées via le réseau de capteurs vers le puits. Ce processus de routage augmente le nombre de paquets dans le réseau, et par conséquent, l'énergie dépensée par les capteurs. Pour cela, nous avons proposé une approche qui a pour premier objectif une minimisation de l'énergie consommée par les capteurs et second objectif une minimisation de la consommation d'énergie du drone en minimisant la longueur du chemin. Nous abordons la solution de ce problème en deux étapes. Tout d'abord, nous devons sélectionner les capteurs qui doivent agir en tant que tête de cluster, puis calculer le chemin que le drone devrait suivre pour couvrir ces têtes de cluster. Pour la sélection de la tête de cluster, nous utilisons comme critère le nombre maximum de sauts permis entre un capteur et la tête de cluster. Par la suite, afin de calculer le chemin du drone pour couvrir toutes les têtes de cluster, nous proposons d'utiliser l'heuristique 2-opt.

Dans notre seconde contribution, nous avons proposé une solution basée sur les champs potentiels artificiels (APF : Artificial Potential fields). Cette approche a le même objectif que la proposition précédente qui est de récolter le maximum de données présentes dans le réseau.

En résumé, le champ de capture est divisé en un ensemble de cellules dans lesquelles se trouvent un ou plusieurs nœuds capteurs. Chacune de ces cellules est la source d'une force virtuelle (force attractive). Cette dernière correspond à la somme des forces émises par les nœuds se trouvant à l'intérieur de ces zones. L'intensité de la force d'attraction de chaque nœud capteur est proportionnelle à la quantité de données stockées dans leur mémoire : plus elle est élevée plus la force d'attraction est grande. Lors de son processus de collecte, le drone se dirigera vers les zones ayant la plus grande force d'attraction ou en d'autres termes vers les zones où les données sont les plus présentes.

Notre troisième contribution, quant à elle, est une solution dynamique. Le drone n'a pas de chemin prédéfini lorsqu'il commence son processus de collecte. En résumé, à chaque nœud du réseau, nous assignons un poids qui correspond à sa priorité dans le processus de collecte. Chaque fois que le drone doit choisir une destination, il se dirigera vers le nœud ayant le poids le plus élevé. Nous avons proposé deux solutions de planification de trajectoire du drone qui se basent sur des fonctions d'utilités. Ces fonctions utilisent des informations transmises par les nœuds capteurs et qui sont propagées dans le réseau au sol à l'aide du protocole de routage OLSR. En effet, les informations nécessaires au calcul du poids de chaque nœud sont greffées aux paquets échangés lors de l'exécution de OLSR.

La première solution proposée prend en considération la quantité de données stockées dans chaque nœud et la distance qui sépare ce nœud du drone. Cette méthode permet, en effet, de récolter un maximum de données du réseau. Nous avons constaté qu’avec cette dernière solution, le drone peut récupérer des données obsolètes ou inutiles. C’est dans ce sens que nous nous sommes dirigé la seconde solution : nous avons intégré à la solution précédente un paramètre qui est l’âge des données. En d’autres termes, chaque nœud du réseau reçoit un poids en fonction de l’âge de la plus ancienne donnée stockée dans son buffer. Cette méthode permettra au drone de récupérer les données avant qu’elles n’atteignent leurs dates d’expiration.

1.3 Structure de la thèse

La suite du manuscrit est organisée en deux parties principales. La première partie est consacrée à un état de l’art sur les WSN et la collecte de données grâce à des sink mobiles. La deuxième partie est composée de trois chapitres représentant nos trois contributions.

Dans le chapitre 2 nous introduisons les WSN stationnaires en présentant quelques définitions de base leurs caractéristiques, leurs contraintes, les composants et les différents domaines de leurs applications. Ensuite, nous consacrons une partie du chapitre aux RCSFs à élément mobile (WSN-ME). Nous définirons ainsi la mobilité dans les RCSFs en général en discutant ses avantages, ses raisons, les types de mobilité ainsi que les défis à relever. Nous nous focaliserons sur la mobilité du collecteur de données et plus particulièrement sur l’une des tâches les plus importantes dans les WSN, à savoir la collecte de données.

Le chapitre 3 présente notre première contribution. Cette méthode est une approche statique d’optimisation du chemin de collecte de données en utilisant un drone. Elle vise à étudier les performances du réseau et celles du drone. Les résultats obtenus sont étudiés afin de trouver le meilleur compromis entre l’énergie consommée par les nœuds capteurs et la distance parcourue par le drone.

Dans le chapitre 4, nous présentons notre seconde contribution qui est une heuristique basée sur les champs potentiels artificiels. Nous donnons d’abord des notions de base sur les champs potentiels artificiels suivie d’un état de l’art sur leur utilisation dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous présenterons par la suite notre solution qui vise à guider le drone à l’intérieur du champ de capture pour récolter le maximum de

données.

Le chapitre 5 quant à lui décrit notre 3e contribution qui est une solution dynamique. Nous avons simulé nos propositions afin d'étudier leur impact sur la collecte des données dans le but d'améliorer les performances du réseau. Ces simulations ont été réalisées sous l'environnement INET et les résultats obtenus seront discutés et comparés afin de désigner le meilleur modèle de mobilité selon les besoins de l'utilisateur.

Enfin, nous présentons dans le chapitre 6 une conclusion de notre travail. Nous y présenterions un bref résumé des contributions apportées et donnons quelques perspectives en vue de futures directions de recherche.

Chapitre 2

WSN et Collecte de données

2.1 Introduction

Grâce aux progrès de la technologie sans fil et de l'électronique numérique, certains petits dispositifs ont été utilisés pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF) qui est nécessaire pour résoudre divers problèmes. Ces appareils sont capables de détecter des événements ou des grandeurs, de traiter les données et de communiquer avec d'autres appareils. Ils sont généralement composés de radios basse consommation, de plusieurs capteurs intelligents et de processeurs embarqués. Aujourd'hui on peut facilement envisager un large éventail d'applications tel que surveillance environnementale, la sécurité, la santé, ... etc.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord définir un réseau de capteurs sans fil, présenter ses caractéristiques et ses facteurs de conception. Ensuite, nous allons décrire son architecture et ses domaines d'application. Nous allons, par ailleurs, introduire quelques notions de base sur la collecte de données dans ces réseaux. Pour finir, nous allons présenter un état de l'art sur la collecte des données avec des UAV (Unmanned Aerial Vehicle), les problématiques qui sont induites et les solutions de la littérature.

2.2 WSN statiques

2.2.1 Définition et Composition d'un WSN

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) ou Wireless Sensor Network (WSN) est un réseau constitué d'un grand nombre de noeuds qui détectent l'environnement et

envoient leurs lectures vers un noeud considéré comme point de collecte appelé noeud puits ou sink en anglais [10]. Ce processus est illustré dans la figure 2.1. Les appareils composant un WSN sont appelés noeuds capteurs. Ils sont caractérisés par leur petite taille, leur faible puissance de calcul et de traitement, leur mémoire réduite ainsi que leur capacité énergétique limitée, en plus de leur leurs capacités d'auto-organisation et de coopération, leur rapidité de déploiement et leur tolérance aux erreurs et leur faible coût [34].

Un WSN est généralement constitué de plusieurs noeuds capteurs qui sont alimentés par des batteries et ont, donc, une énergie limitée. leur rôle est de capter les données environnementales et les transmettre au point de collecte. Un WSN contient également un Sink qui est chargé de recevoir les données issues des différents noeuds capteurs. Un réseau de capteurs peut contenir plus d'un sink dans le but alléger la charge dans les réseaux à forte densité [86]. figure 2.1. Le WSN est, aussi, constitué d'un centre de traitement des données qui est le point vers lequel les données collectées par le Sink sont envoyées. Ce centre a pour rôle d'assembler les données issues des noeuds et les traiter afin d'en extraire les informations utiles et exploitables.

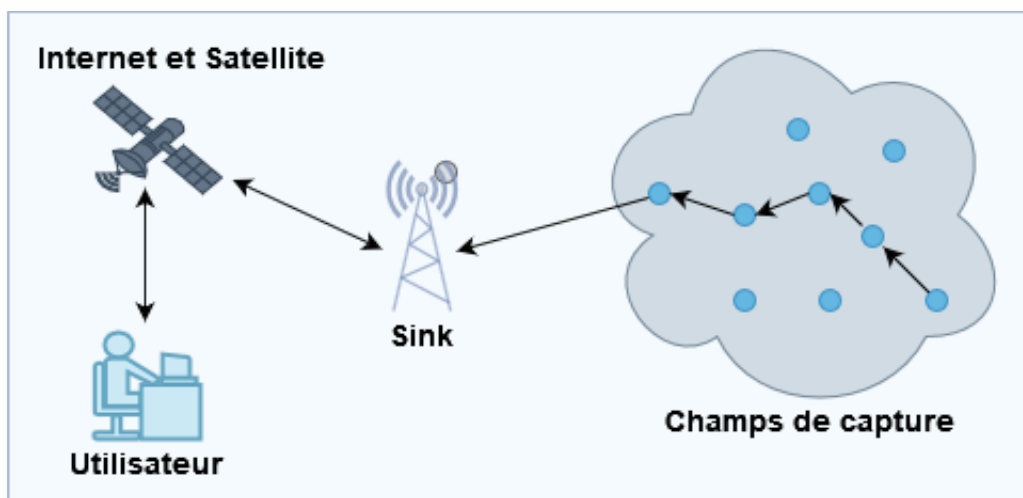


FIGURE 2.1 – Architecture d'un WSN

2.2.2 Architecture d'un noeud capteur

Un noeud capteur est composé de quatre unités de base : l'unité de détection ou de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission ou de communication et l'unité de

contrôle d'énergie (Voir figure 2.2). Ce dernier peut également avoir, suivant les besoins

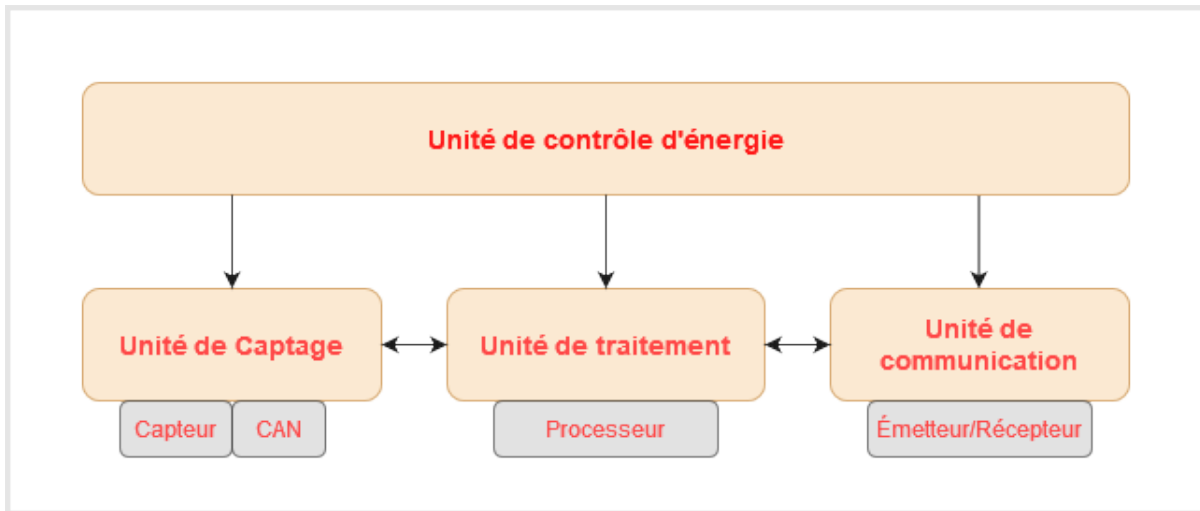


FIGURE 2.2 – Architecture d'un noeud capteur

de l'utilisateur, des unités additionnelles telles qu'une unité de localisation (exemple : GPS pour Global Positionning System) ou un générateur d'énergie (cellule solaire ou photo-voltaïque). Il existe aussi des capteurs plus complexes, dotés d'un mobilisateur chargé de gérer les déplacements du capteur en cas de nécessité.

Unité de captage (Sensing unit) Cette unité est composée de deux sous unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (Analog to Digital Converter) qui convertit l'information prélevée et la transmet à l'unité de traitement. Un noeud capteur peut disposer d'une ou plusieurs unités de captage [102].

Unité de traitement (Processing unit) Cette partie est composée d'un processeur et d'une unité de stockage de faible capacité intégrant un système d'exploitation spécifique (TinyOs par exemple). Cette unité possède deux interfaces : une première interface pour acquérir des informations en provenance de l'unité de captage. La seconde interface est utilisée pour transmettre ces informations à l'unité de transmission. Cette dernière est chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent de faire collaborer les noeuds du réseau entre eux.

Unité de communication (Transceiver unit) Aussi appelée module Radio, cette unité permet aux noeuds du réseau de communiquer entre eux. En effet, elle effectue

toutes les émissions et les réceptions de données via un support radio. Trois médiums de communication sans fil peuvent être utilisés : LASER, infrarouge et radio-fréquences (RF). La RF reste le moyen le plus répandu pour la communication des capteurs.

Unité de contrôle d'énergie C'est l'une des composantes les plus importantes d'un noeud capteur. Elle sert à alimenter tous les autres composants. Cependant, à cause de sa taille réduite, la batterie dont il dispose est limitée et le plus souvent ni rechargeables ni remplaçable. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc d'un réseau de capteurs.

2.2.3 Caractéristiques et Contraintes des WSN

Les réseaux de capteurs sont influencés par plusieurs facteurs de conception qui utilisent les caractéristiques et les contraintes des WSN afin de concevoir des algorithmes et protocoles appropriés. Ces facteurs sont présentés ci-dessous :

L'auto-configuration des nœuds capteurs : Dans un WSN, les nœuds capteurs sont très souvent déployés à l'intérieur de la zone de capture de manière aléatoire grâce à des avions ou des drones, etc. Ils disposent d'une unité de communication pour échanger des informations avec leurs nœuds voisins afin d'établir la topologie du réseau. Cette topologie peut être dynamique à cause de la défaillance occasionnelle de certains nœuds, de l'ajout de nœuds ou de la mobilité de ces nœuds.

Scalabilité : Le réseau de capteurs doit être scalable, c'est-à-dire être en mesure de prendre en charge un très grand nombre de noeuds tout en ayant la possibilité d'augmenter ce nombre et la densité de ce dernier dans une région (pouvant dépasser 20 noeuds/m²). La conception de protocoles pour ces réseaux doit pouvoir prendre en compte ce nombre de noeuds capteurs et de s'adapter lors de son augmentation.

Tolérance aux pannes : Le fonctionnement des WSN peut être perturbé par les pannes que peuvent subir les noeuds capteurs. Ces pannes ou ces dysfonctionnements sont souvent causés par l'absence d'énergie ou par des interactions externes (dommage physique, interférences environnementales). La tolérance aux pannes est la capacité d'un WSN à maintenir les fonctionnalités du réseau de capteur sans interruption après

l'apparition des pannes de nœud. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau [30].

Coût de fabrication : Comme cité plus haut, un WSN est le déploiement d'un grand nombre de noeuds capteurs. Le coût de déploiement d'un réseau est proportionnel à celui d'un seul noeud. L'utilisation de ces WSN n'est envisageable que si le coût de ce dernier est inférieur à celui du déploiement des réseaux classiques [62].

Contrainte d'énergie : Les noeuds capteurs se servent de batteries de petite taille comme source d'énergie, ce qui limite leur durée de vie. La spécificité des applications des WSN fait qu'il est souvent impossible ou difficile de recharger ou de remplacer ces batteries [134]. De ce fait, nous déduisons que la durée de vie d'un noeud est essentiellement dépendante de la durée de vie de sa batterie, et que la durée de vie d'un réseau est proportionnelle à la durée de vie des noeuds capteurs qui le forment. Ainsi, la méthode de gestion de consommation d'énergie est une contrainte essentielle dans la conception de ce type de réseaux.

2.2.4 Domaine d'utilisation des WSN

le champ d'applications des réseaux de capteurs a été élargi grâce au faible coût de production des noeuds capteurs, de leur taille réduite, du support de communication sans fil utilisé ainsi que de la disponibilité d'un large panel de capteurs (thermique, optique, vibrations...). Un autre avantage est la possibilité de déploiement dans des environnements hostiles ou inaccessibles. Nous présentons dans ce qui suit les domaines les plus ciblés par les RCSF

2.2.4.1 Applications militaires :

L'exploitation militaire est l'une des principales applications des réseaux de capteurs. En effet, elle a été, comme dans le cas de plusieurs technologies, un précurseur pour le développement d'applications de réseaux de capteurs [34].

Dans ce cas, les WSN sont utilisés pour fournir des services tels que :

- L'analyse du terrain avant d'y envoyer des troupes [103].
- La surveillance du champ de bataille [106] [18].
- La surveillance de tous les mouvements (amis ou ennemis).
- Le repérage des cibles [68].

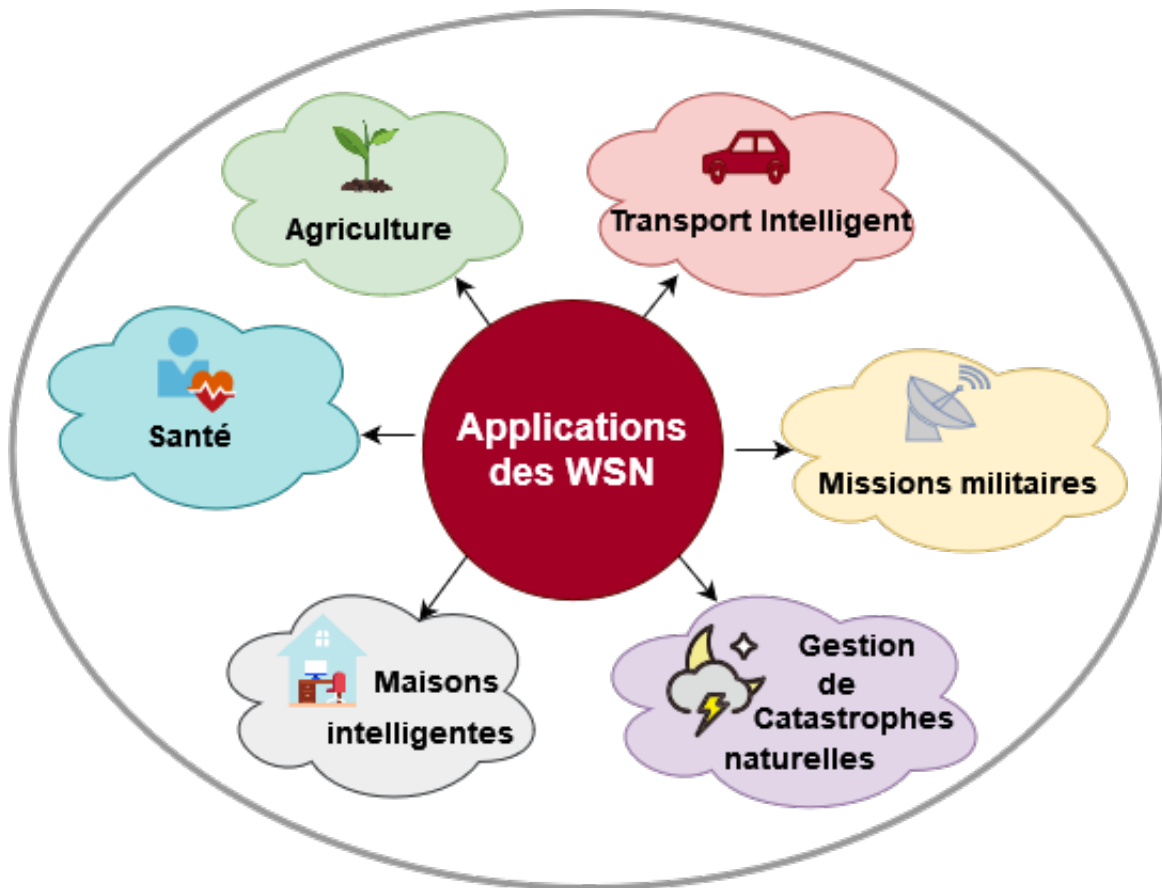


FIGURE 2.3 – Domaines d’application des WSN

— Le repérage des dégâts sur le terrain après la bataille.

2.2.4.2 Applications environnementales :

Dans des applications environnementales, les exigences d’un réseau de capteurs sont différentes des caractéristiques des autres applications. En effet, les évènements détectés ou les grandeurs captées telles que la température ou l’humidité ne changent pas rapidement. Dans ce cas, les noeuds capteurs n’ont pas besoin d’un débit de transmission élevé et les noeuds ne sont pas soumis à des exigences strictes de latence (la transmission des données peut être différée sans altérer de manière significative le résultat désiré). Dans le domaine environnemental, les réseaux de capteurs sans fil sont souvent utilisés pour détecter des problèmes tels que les inondations [97], les incendies [35] et la pollution [38], etc.

2.2.4.3 Applications Médicales :

Un WSN est en mesure de procurer des fonctionnalités qui contribuent à réduire la charge de travail du personnel médical et à offrir une plus grande liberté aux patients. En effet, les WSNs sont souvent utilisés pour la surveillance des malades, des micro-capteurs leur sont implantés ou avalés afin de mesurer par exemple leur glycémie, leur tension artérielle ou les battements du coeur [32]. Ils sont aussi utilisés pour le sauvetage de personnes [41] ou pour l'assistance de personnes invalides [127].

2.2.4.4 Applications domestiques :

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés dans un environnement domestique afin de faciliter la vie des habitants. Les capteurs sont, par exemple, intégrés aux aspirateurs, aux climatiseurs, aux chauffages, aux réfrigérateurs ou encore aux téléviseurs afin de les contrôler localement ou à distance. Un nouveau domaine d'étude est en plein essor, celui des maisons intelligentes [65] [85]. Ces maisons sont dotées, entre autres, de systèmes de sécurité se basant sur les WSNs. Par exemple, une alarme est déclenchée lorsque la présence d'un intrus est détectée [46]. Elles peuvent aussi être dotées de capteurs qui aident à automatiser certaines actions de la vie quotidienne tel que l'extinction des lumières, l'ajustement du chauffage ou de la climatisation selon les mesures prises à différents points de collecte.

2.2.5 Consommation énergétique dans les WSN

2.2.5.1 Sources de consommation d'énergie :

Comme cité précédemment, les noeuds capteurs sont alimentés par des batteries. Ils sont, le plus souvent, déployés dans des zones inaccessibles ou dangereuses ce qui empêche de les changer ou de les recharger [52].

La consommation d'énergie vient principalement des trois unités de base :

- **MCU : MicroController Unit**

L'unité de contrôle a un rôle très important dans le processus de gestion de la consommation d'énergie. En effet, cette unité peut se mettre sur trois modes différents (Actif, Idle et sommeil). Le mode actif est le mode qui consomme le plus d'énergie. Il est aussi noté qu'une quantité d'énergie supplémentaire est consommée lors du passage d'un mode à un autre.

- **Radio :**

Cette unité est considérée comme étant l'unité qui consomme le plus d'énergie, particulièrement lorsque cette dernière est en mode "Transmission" ou en mode "Reception". Lorsque l'unité Radio est en mode "Idle", cette dernière consomme presque autant d'énergie que dans les deux modes précédents. Il est, donc, conseillé de mettre la radio en mode "Sommeil" dès que cela est possible. Par ailleurs, l'activité électrique des circuits lors du passage d'un état à un autre engendre une consommation supplémentaire de l'énergie du noeud.

— **Le capteur :**

Le module de détection consomme de l'énergie en accomplissant les tâches suivantes : l'échantillonnage, la conversion analogique/numérique, l'analyse du signal ainsi que l'activation et la désactivation de la sonde de détection.

L'énergie consommée par l'unité de capture est très souvent négligée par rapport à l'énergie consommée par l'unité de transmission [93] [52]

2.2.5.2 Sources de gaspillage d'énergie :

Nous avons étudié dans la section précédente les causes principales de la consommation énergétique des WSNs. D'autres facteurs de consommation d'énergie existent qui induisent à une surconsommation ou un gaspillage d'énergie, dont les principales causes sont présentées ci-après :

— **Collisions et Retransmission :**

Dans les communications radio, tous les noeuds capteurs se trouvant dans un même rayon de communication doivent partager le même canal qui ne supporte qu'une seule transmission à la fois. Lorsque deux noeuds capteurs ou plus transmettent simultanément, les messages se mélangent et ne peuvent pas être déchiffrés par le récepteur. Ce phénomène est appelé "Collision". Dans ce cas, les paquets en question doivent être abandonnés et retransmis ce qui engendre un coût énergétique supplémentaire.

— **L'écoute à vide (Idle Listening) :**

Ce mode correspond au moment où le noeud capteur est en mode écoute du canal alors qu'il ne reçoit pas de paquets. Dans ce cas, le noeud consomme presque autant d'énergie que lors d'une réception de paquet.

— **Réception indésirable (Overhearing) :**

Cette situation se produit lorsque le noeud reçoit des paquets dont il n'est pas le destinataire. Ce phénomène est aggravé dans les réseaux à fort trafic ou à forte

densité.

— **Envoie infructueux (Over Emitting) :**

Une autre cause fréquente de la surconsommation d'énergie dans les WSNs se produit lorsqu'un noeud capteur envoie des données, mais que le récepteur n'est pas prêt à les recevoir. Le noeud récepteur n'envoie donc pas d'accusé de réception, ce qui fait que le noeud émetteur renvoie le paquet plusieurs fois. Cette situation engendre un gaspillage d'énergie.

— **Surcharge des paquets de contrôle :**

Des paquets de contrôle sont nécessaires afin d'encapsuler les données lors de l'exécution des protocoles réseaux. L'envoi, la réception et l'écoute des paquets de contrôle consomment de l'énergie et de la bande passante réduisant ainsi le débit effectif et la durée de vie du réseau. On parle alors d'overhead des paquets de contrôle [34].

2.2.6 Méthodes d'optimisation de la consommation d'énergie dans les WSNs

Malgré les progrès réalisés ces dernières années pour minimiser la consommation énergétique des noeuds capteurs visant à prolonger leur durée de vie, cette dernière reste encore un défi majeur. Plusieurs techniques sont proposées pour y parvenir.

2.2.6.1 Techniques basées sur le Duty Cycling :

L'unité radio est la principale unité qui est la plus gourmande en énergie. L'une des solutions proposées pour réduire ce problème est le "DUTY CYCLING". Nous pouvons le définir comme étant le balancement entre les deux états actif et sommeil que peut prendre la radio d'un noeud. En effet, le module radio d'un noeud capteur doit être éteint lorsqu'il n'y a plus de données à envoyer ou à recevoir.

Dans un WSN, les noeuds travaillent en collaboration afin d'utiliser les solutions de Duty Cycling, tous les noeuds de réseau doivent coordonner leur temps d'éveil/sommeil en utilisant des algorithmes d'ordonnancement [115].

2.2.6.2 Techniques basées sur les données :

Il existe plusieurs techniques d'optimisation de la consommation d'énergie basées sur les données. Ces méthodes visent à réduire les échantillons de données afin de diminuer

le nombre de communications. Elles sont classées en deux catégories : Réduction des données ou acquisition de données efficaces en énergie.

La première catégorie utilise plusieurs méthodes afin de réduire la quantité de données transmises au noeud sink telle que l'agrégation des données (somme, moyenne...etc). La compression est une seconde méthode très souvent appliquée. Dans ce cas, différents algorithmes d'encodage et de décodage doivent être utilisés.

La seconde catégorie est moins étudiée que la première [108]. Les techniques d'acquisition de données éco-énergétiques ne visent pas à réduire la consommation d'énergie du sous-système radio, mais plutôt celle du sous système de détection [12].

2.2.6.3 Techniques Hiérarchiques :

Dans un WSN, lorsque le nombre de noeuds devient trop grand, la gestion du réseau est plus compliquée. En effet, afin de prolonger sa durée de vie, il est nécessaire de bien structurer les noeuds sur le réseau. L'une des structures les plus utilisées est la hiérarchisation. Elle consiste à diviser le réseau en sous groupes qui donnent différentes vues locales et facilite sa gestion.

Il existe plusieurs types de structures hiérarchiques dont les zones, les clusters et les chaînes [34]. la structure en zone consiste à rassembler les noeuds en groupes selon un critère de sélection (la proximité géographique par exemple). La structure en cluster est une catégorie très similaire à la structure en zone. La différence est que pour cette structure un noeud est choisi pour jouer le rôle de chef de groupe. Ce noeud est appelé Cluster Head (CH) ou tête de cluster. En effet, dans ce type de topologie, les noeuds capteurs standards envoient leurs données aux noeud CH qui s'occupent de les transmettre à la station de base. Une autre structure utilisée est la structure en chaîne [69]. Dans cette structure, chaque noeud capteur n'échange qu'avec deux voisins seulement.

Grâce à la structuration, la gestion des réseaux à forte densité est facilitée, car le réseau est divisé en sous groupes à gérer individuellement.

2.2.6.4 Techniques basée sur la mobilité :

Dans les réseaux de capteurs classiques, les données sont envoyées au sink grâce à des communications multi-sauts en trouvant un chemin avec des noeuds capteurs. Dans ce cas, les noeuds capteurs se trouvant à proximité du sink sont plus sollicités que les autres noeuds du réseau et peuvent venir à bout de leur énergie malgré l'utilisation des techniques de conservation d'énergie citées précédemment.

Une solution a été récemment proposée qui est l'introduction de la mobilité afin de réduire la charge sur les noeuds voisins du sink. En effet, l'idée est d'utiliser des collecteurs mobiles appelés mules. Dans ces réseaux, les noeuds capteurs sont statiques et le sink est placé sur des entités mobiles et doit se déplacer à l'intérieur du champs de capture afin d'en récolter les données. Les noeuds capteurs captent les données environnementales et attendent qu'un sink vienne à proximité afin de lui envoyer leurs données.

2.2.7 Types de WSN

Actuellement, il existe cinq types de réseaux de capteurs illustrés dans la figure 2.4. Chacun est déployé dans un environnement particulier et doit respecter certaines contraintes et challenges au moment de la conception :

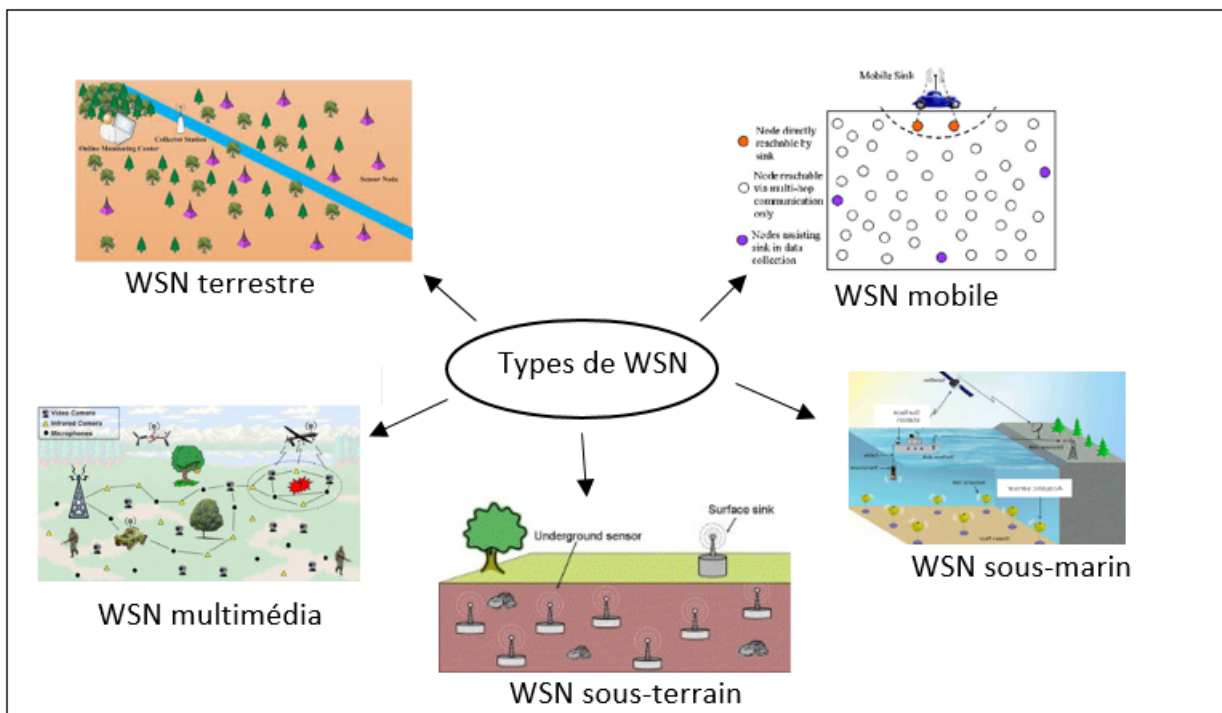


FIGURE 2.4 – Types de WSN [1]

2.2.7.1 WSN Terrestre (Terrestrial WSN)

Un WSN terrestre est composé de centaines voir de milliers de noeuds capteurs déployés au dessus du sol. Les noeuds sont placés aléatoirement dans une zone de

capture afin d'en récolter certaines informations. Un deuxième type de déploiement utilisé est le placement déterministe. Dans ce cas, les noeuds capteurs sont placés un à un autour ou à l'intérieur de la zone à observer afin d'obtenir un placement optimal selon les besoins de l'application utilisée. Les noeuds capteurs étant placés au dessus du sol, ils peuvent être équipés de cellules solaires afin d'alimenter leurs batteries. La conservation d'énergie de ces WSN est obtenue en utilisant des opérations de duty cycling, en minimisant les retards et en assurant un routage optimal. etc [31].

2.2.7.2 WSN Sous-terrain (Underground WSN)

Un WSN sous-terrain se compose d'un certain nombre de noeuds capteurs déployés dans des grottes, des mines ou des métros pour surveiller les conditions sous-terraines [9] [67].

Ces réseaux sont plus coûteux que les réseaux terrestres. En effet, afin de récupérer les données captées sous le sol, un ensemble de noeuds relais doit être déployé au dessus du sol pour s'occuper de transmettre les données reçues vers la stations de base. Dans un environnement sous-terrain les communications sont un défi à cause de l'atténuation et la perte du signal qui doit traverser le sol pour arriver au(x) sink(s).

Ces réseaux son utilisés dans différents domaines tels que l'agriculture [17] et la surveillance des frontières [64], etc.

2.2.7.3 WSN Sous-marin (Underwater WSN)

Dans ce type de réseaux, les noeuds sont déployés sous l'eau et un véhicule sous-marin est utilisé pour récolter les données captées par ces noeuds [57].

Les principaux défis dans ce genre de réseaux sont la bande passante limitée et les délais de propagation élevés à cause des ondes acoustiques utilisées comme support de communication [105].

Ces réseaux sont utilisés par exemple pour la surveillance des activités sismiques [98] ou pour la détection et la prévention de la pollution des eaux [53].

2.2.7.4 WSN Multimédia (Multimedia WSN)

Les WSN multimédia sont composés de noeuds capteurs équipés avec des appareils multimédia (caméra et microphones). Ils sont capables de récupérer les données multimédia, les traiter et les stocker. Ils sont utilisés dans des applications de suivi ou de surveillance [104].

Les principales caractéristiques de ces réseaux sont l'exigence élevée en matière de bande passante et la consommation d'énergie élevée ainsi que la nécessité de traiter les données et de développer des techniques de compression.

2.2.7.5 WSN Mobiles (Mobile WSN)

Nous définissons les réseaux de capteurs mobiles sans fil (MWSN) comme une classe spéciale de WSN dans lesquels un ou plusieurs composants du réseau sont mobiles. Le composant mobile peut être l'un des nœuds de capteur, des relais (le cas échéant), des sinks (ou puits de données) ou toute combinaison de ceux-ci. Du déploiement à la diffusion en passant par la collecte de données, la mobilité joue un rôle clé dans presque toutes les opérations du réseau de capteurs. Par exemple, un nœud mobile peut visiter d'autres nœuds du réseau et collecter des données directement via des transmissions à un seul saut. De la même manière, un nœud mobile peut se déplacer sur le réseau de capteurs et collecter les messages des capteurs, les stocker dans son buffer puis les transférer vers la station de base. Cela réduit non seulement les collisions et la perte de messages, mais simplifie également la tâche de transfert de données par nœud et, par conséquent, répartit la consommation d'énergie plus uniformément sur le réseau.

L'utilisation des MWSN peut apporter plusieurs avantages au processus de collecte de données, parmi lesquels on peut trouver :

- **Connectivité** : Étant donné la mobilité des nœuds, une architecture WSN dense peut ne pas être requise. Les éléments mobiles peuvent résoudre le problème des régions isolées, de sorte que les contraintes sur la connectivité du réseau peuvent être réduites, y compris dans le (re)déploiement des nœuds. En conséquence, une architecture WSN fragmentée devient une option réalisable [61].
- **Coût** : En introduisant la mobilité dans les réseaux de capteurs, moins de nœuds peuvent être déployés, le coût de son déploiement peut être fortement réduit. Si l'ajout de fonctions de mobilité aux nœuds peut être coûteux, il est souvent possible d'exploiter les éléments mobiles déjà présents dans la zone de détection (trains, bus, navettes ou voitures par exemple) et d'y installer des capteurs.
- **Fiabilité** : Les WSN traditionnels (statiques) sont souvent denses et les communications sont souvent multi-sauts (ad hoc), la fiabilité est compromise par les interférences et les collisions. De plus, la perte de messages augmente avec le nombre de sauts. L'utilisation d'éléments mobiles permet de visiter les nœuds du réseau et de collecter des données directement via des transmissions à un seul

saut. Cela permet de résoudre ces nombreux problèmes [129].

- **Efficacité énergétique** : le modèle de trafic fréquemment utilisé dans les WSN est converge-cast, ce qui signifie que les messages sont générés par des nœuds capteurs et collectés par le sink. En conséquence, les nœuds proches du puits sont plus surchargés que les autres et peuvent manquer d'énergie prématurément. Ce problème est connu sous le nom d'effet d'entonnoir, car les voisins puits sont le goulot d'étranglement du trafic [133]. Les éléments mobiles peuvent aider à faire face à l'effet d'entonnoir, car ils peuvent visiter différentes régions du réseau et répartir la consommation d'énergie de manière plus uniforme, même dans le cas d'une architecture WSN dense.

Malheureusement, malgré les multiples avantages apportés par la mobilité, il y a également un certain nombre de défis que nous devons relever tels que :

- **Fiabilité** : La fiabilité est également un défi important pour les MWSN car le temps disponible pour la détection et la communication avec un nœud mobile est court en raison de son mouvement. Les liaisons peuvent se rompre fréquemment en raison de l'affaiblissement des canaux, des interférences et de la mobilité des nœuds [101].
- **Topologie de réseau dynamique** : L'un des premiers défis concerne les nouveaux protocoles des couches Réseau et MAC (Medium access control). En effet, pour faire face à la nature dynamique de la topologie de ce type de réseaux, il est nécessaire de proposer de nouveaux protocoles de routage, des protocoles MAC ainsi que des protocoles de planification de chemin, afin d'optimiser les performances du MWSN. Par exemple, les protocoles de routage WSN statiques peuvent fournir les fonctionnalités requises, mais ne peuvent pas gérer la mobilité, tandis que les protocoles de routage du réseau mobile ad hoc (MANET) peuvent gérer la mobilité dans le réseau, mais ils ne sont pas conçus pour une communication unidirectionnelle, ce qui est souvent le cas dans les réseaux de capteurs.
- **Mobilité/Planification des chemins** : La planification des chemins est un problème fondamental dans la collecte de données basée sur les sinks mobiles. La planification de trajectoire consiste à concevoir une solution mobile optimale afin de minimiser au maximum le nombre de relais et la distance de déplacement du sink. Cela pourrait réduire non seulement les retards dans l'ensemble du réseau, mais également la consommation d'énergie des nœuds situés à proximité de la station de base, ce qui contribue à prolonger la durée de vie du réseau.

2.3 Collecte de données dans les réseaux de capteurs

Dans la plupart des applications dans les WSN, il est nécessaire de déployer des centaines, voir des milliers de noeuds dans une zone très vaste. Il est donc nécessaire d'établir des communications multi-saut pour récolter les informations disponibles au niveau des noeuds capteurs.

Une des premières solutions proposées pour la collecte de données est d'utiliser un protocole de routage. Le routage permet de sélectionner le chemin (ou la route) approprié pour que les données arrivent jusqu'à la station de base ou sink.

Plus récemment, une seconde solution est proposée qui est l'utilisation d'un sink mobile. Dans ce cas, les données stockées dans le buffer des noeuds sont récupérées lors du passage du sink.

Nous présentons, dans cette section, les particularités de ces deux approches

2.3.1 Collecte de données classiques

La conception de protocoles de routage pour les WSN doit se baser sur plusieurs critères dont l'efficacité énergétique, la scalabilité ou la complexité de l'algorithme, etc. Les techniques de routage peuvent être classées en deux catégories selon l'architecture du réseau : Le routage plat ou le routage hiérarchique.

2.3.1.1 Routage plat

Le routage plat est une technique de routage dans laquelle tous les noeuds ont le même degré d'importance, le même rôle et effectuent les mêmes tâches. Le réseau n'est pas hiérarchisé et une route est définie uniquement par les sauts intermédiaires [55]. La Figure ci-dessous montre un exemple d'une topologie plate d'un WSN. Le noeud S désigne la station de base et les noeuds de couleur gris foncé désignent des capteurs. Les données sont routées d'un capteur à un autre afin d'arriver à la destination S .

Nous présentons, dans ce qui suit, quelques exemples de protocoles de routage plat :

— **DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector routing) :**

DSDV est un protocole de routage proactif à vecteur de distance saut par saut [43]. Dans ce protocole, les noeuds sont obligés de maintenir une table de routage contenant le "prochain saut" pour chaque noeud du réseau, le nombre de sauts pour l'atteindre ainsi qu'un numéro de séquence qui aide à identifier

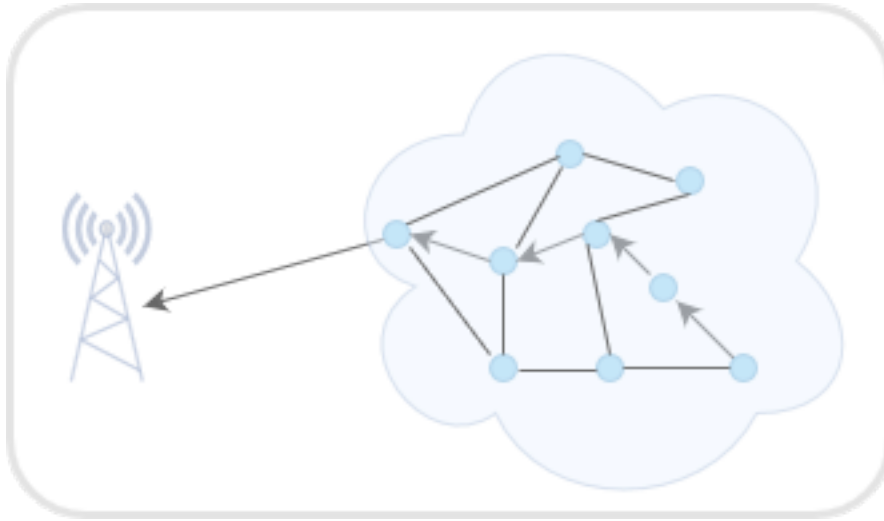


FIGURE 2.5 – Routage Plat

les entrées obsolètes. Ce mécanisme aide à éviter les boucles de routage [83] et donner la priorité aux routes ayant le plus grand numéro de séquence.

— **OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) :**

OLSR est un protocole d'optimisation de l'algorithme état de liaison pure [26]. Il se base sur la notion de MPR (Multi Point Relay) pour acheminer les paquets de contrôle à diffuser dans tout le réseau. L'ensemble des noeuds MPR est sélectionné de façon à couvrir l'ensemble des voisins à deux sauts (voisins des voisins). Grâce à ces MPR, le nombre de retransmissions redondantes pendant la diffusion est considérablement réduit, comme le montre la figure 2.6.

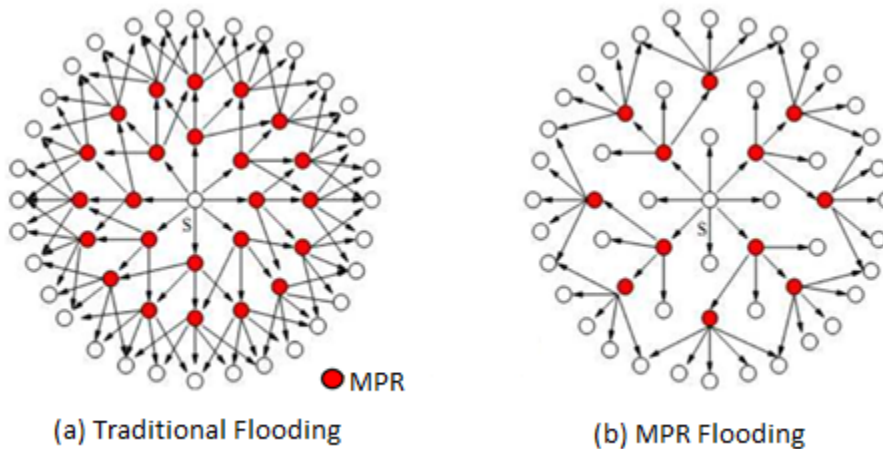


FIGURE 2.6 – Diffusion Classique VS Diffusion MPR [2]

En effet, ce mécanisme aide à réduire la taille de messages de contrôle car il n'utilise que les MPR pour accomplir cette tâche.

2.3.1.2 Routage Hierarchique

Dans les WSN, il existe plusieurs protocoles de routage hiérarchiques. Dans ces protocoles, le réseau est divisé en sous groupes (clusters) et chaque cluster a un noeud chef nommé chef de cluster ou cluster head. Ils sont utilisés dans le but de réduire la consommation énergétique lors du processus de création des routes.

Les noeuds capteurs ordinaires envoient leurs données aux noeuds cluster head qui s'occupent de les transmettre à la station de base. Dans la figure qui suit, nous donnons un exemple de topologie hiérarchique.

Il existe plusieurs protocoles de routage hiérarchiques proposés dans la littérature, nous allons présenter ci-suit quelques exemples :

— **LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) :**

Ce protocole est proposé par Heinzelman.al [43]. Il est basé sur la sélection aléatoire d'une tête de cluster dans chaque cycle de façon à répartir l'énergie de manière égale. Les clusters sont formés de façon à assembler les noeuds proches géographiquement. Les noeuds capteurs se désignent comme cluster heads (CH) en se basant sur des probabilités définies par le protocole et annoncent cela aux autres noeuds du réseau. Ces CHs jouent un rôle d'intermédiaires entre les noeuds capteurs et la station de base, ce qui forme la structure hiérarchique du réseau. Ainsi, l'énergie des noeuds est gérée efficacement. En effet, au lieu d'envoyer les données brutes à la station de base, les noeuds capteurs les transmettent d'abord aux Cluster head qui se chargent parfois de les compresser ou même de les assembler en cas de redondance et ensuite les envoyer à la station de base.

— **TEEN :**

TEEN est un protocole de routage réactif et centré sur les données [78]. Il se base sur deux paramètres HT (Hard Threshold) et St (Soft Threshold) qui sont des valeurs qui servent à déterminer la limite de données que peut stocker un noeud capteur avant de devoir les envoyer au cluster head. L'ensemble des clusters head est sélectionné de la même manière que pour le protocole de routage LEACH.

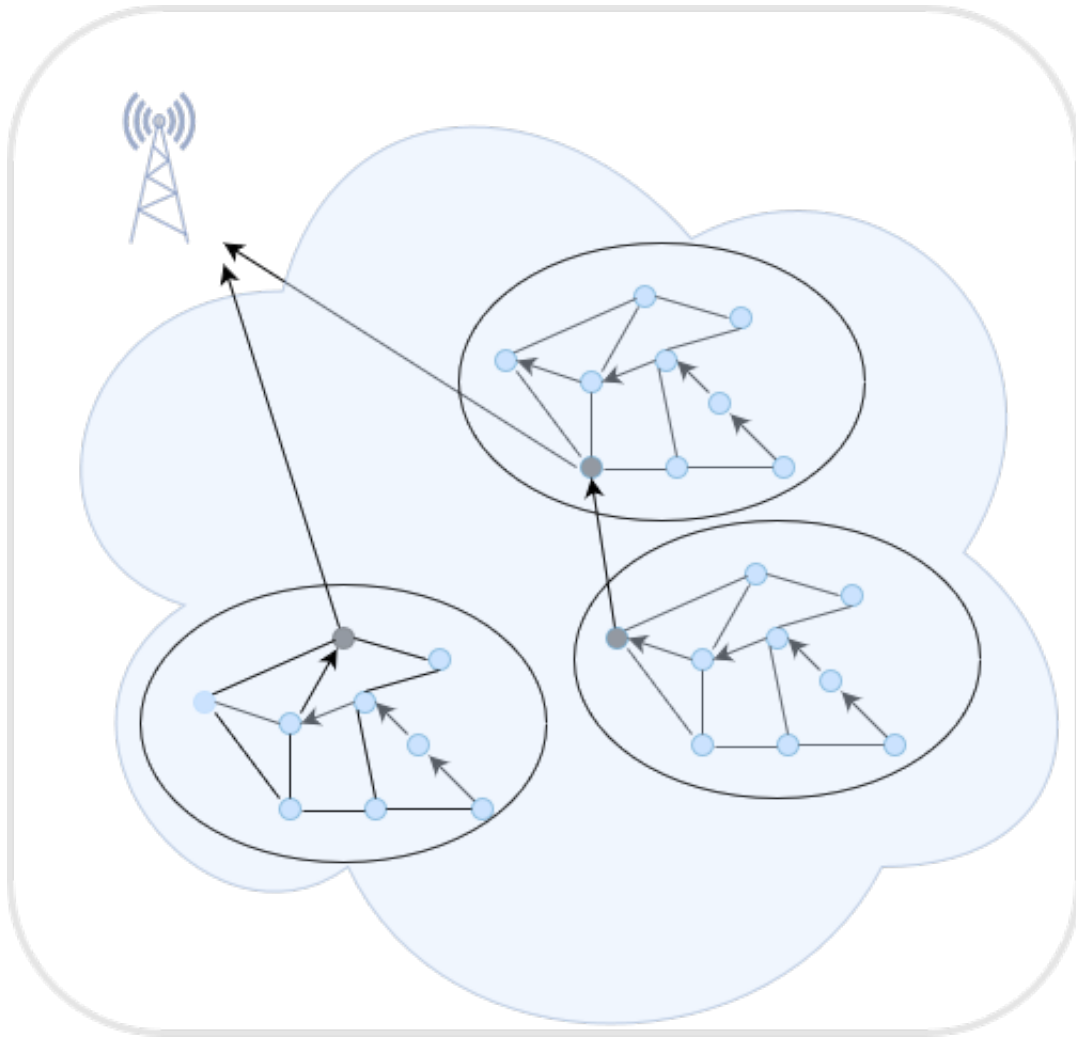


FIGURE 2.7 – Routage hiérarchique

2.3.2 Collecte de données mobile

Les noeuds capteurs utilisent des communications multi-sauts pour transmettre leurs données à la station de base, Ces communications causent un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. En effet, comme cité précédemment, les noeuds à proximité de la station de base sont utilisés comme relais, ce qui fait que ces derniers épuisent plus rapidement leur énergie et par conséquent rendre la station de base inaccessible. Des solutions ont été proposées en plaçant plus de noeuds capteurs autour de la station de base [116]. Mais l'inconvénient est que cela cause un déséquilibre de détection sur les différentes zones du champ de capture [124].

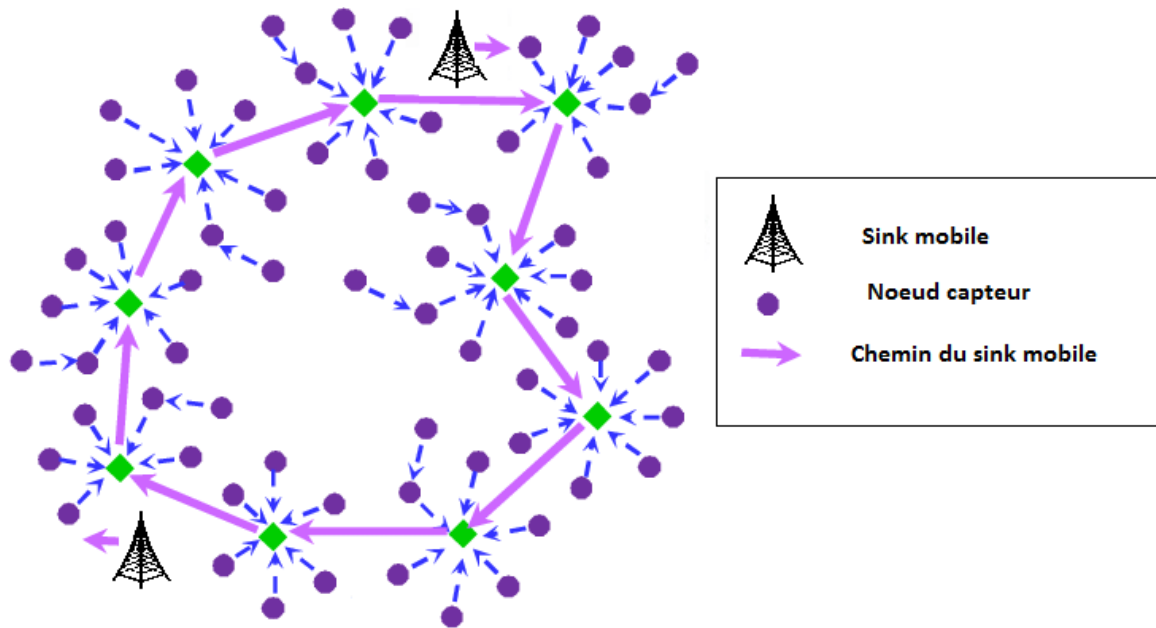


FIGURE 2.8 – Sink mobile

L'utilisation d'un collecteur de données mobile s'est présenté comme l'une des solutions possibles à ce problème pour aider à prolonger la durée de vie du réseau.

2.3.2.1 Role du collecteur de données :

Le collecteur mobile peut avoir deux rôles différents : Sink mobile ou Relais mobile.

— Sink Mobile :

Dans ce cas, le collecteur mobile est la destination finale des noeuds capteurs, il est donc considéré comme le point de convergence de la collecte de données. Les données sont soit utilisées directement au niveau du sink ou dans un autre cas mis à la disposition des utilisateurs distants en utilisant une connexion internet sans fil [33]. L'architecture de ce type de réseaux est représentée dans la figure 2.8.

— Relais Mobile :

Dans ce type de réseaux, l'élément mobile est considéré comme un élément qui circule dans le réseau pour rassembler les données captées par les noeuds capteurs, les stockent pour les transmettre par la suite à la station de base. En effet, contrairement au sink mobiles, ces noeuds ne sont pas le point final de la collecte de données. Les relais mobiles jouent le rôle d'intermédiaires entre les noeuds capteurs et la station de base, ce qui signifie que les données se déplacent

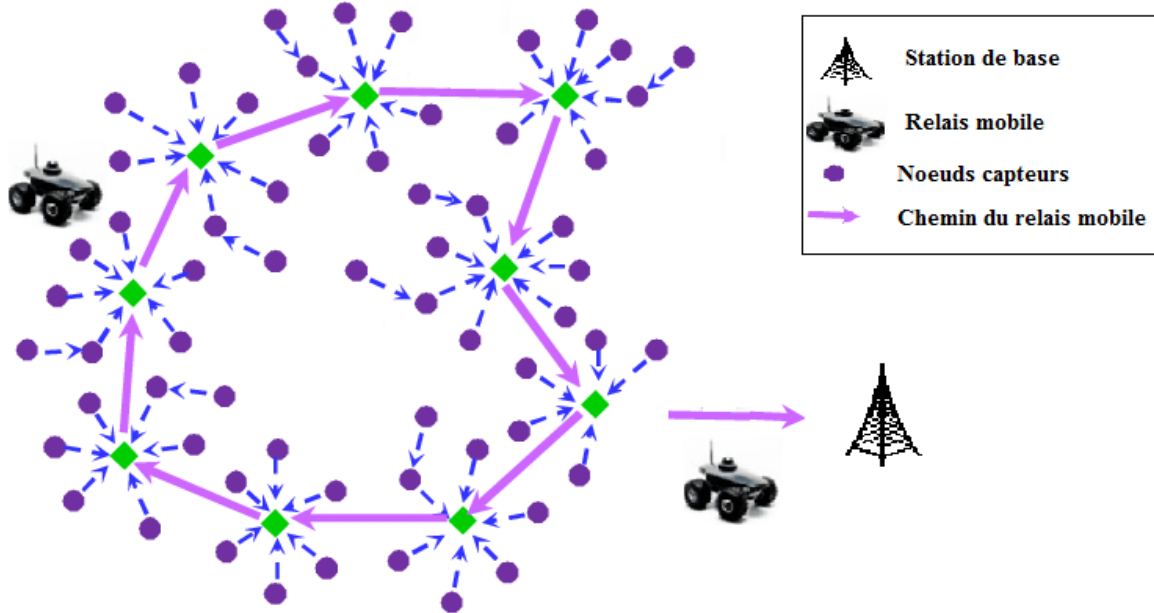


FIGURE 2.9 – Relais mobile

avec ces noeuds jusqu'à ce que ce dernier rentre en contact avec la station de base. L'architecture de base d'un réseau de capteur avec relais mobile est représentée dans la figure .

2.3.2.2 Types de collecteurs de données

Les collecteurs de données mobiles ont été largement utilisés dans les WSN. Nous présentons ci-suit différents types de collecteurs mobiles.

- **Collecteurs terrestres :** Comme cité précédemment, la consommation d'énergie est l'un des facteurs les plus importants dans la conception des WSN. Les communications multi-sauts sont la cause principale de cette grande consommation. Les solutions proposées comme l'utilisation d'un grand nombre de noeuds sink ne sont réalisables que dans des scénarios particuliers où la zone à couvrir est petite. Pour les réseaux plus vastes (à grande échelle), l'utilisation de nombreuses stations de base n'est pas envisageable à cause du coût financier impliqué. C'est dans ce contexte que l'utilisation d'un élément mobile pour la collecte de données est apparue.

Ces éléments mobiles sont en fait des puits mobiles qui embarquent les stations de base. Les chercheurs ont utilisé différentes entités mobiles comme les

mules [24] [96], des robots [14] [117], des animaux [88] [51] ou même des navettes de bus [45].

Cependant l'utilisation de puits mobiles terrestres a montré certains inconvénients dont la longue latence de communication et de transmission des paquets d'un côté ou l'incapacité du puits terrestre d'accéder à des zones endommagées ou ayant beaucoup d'obstacles.

— **Les satellites :**

Les puits mobiles terrestres présentant le désavantages d'être inutilisables sur certaines zones inaccessibles, les satellites se sont présentés comme une solution possible. En effet, un satellite couvre une grande surface de la terre, trois satellites suffisent à couvrir la terre entière [20].

Un autre avantage de l'utilisation des satellites en tant que puits mobiles est que les spécificités de ces derniers correspondent pleinement à certaines applications des WSN qui ont besoin d'un fort débit de transmission [20].

Cependant l'inconvénient de ces réseaux est le coût exorbitant d'exploitation des satellites [94].

— **Les ballons stratosphériques :**

Cette solution a été pensée afin de palier aux inconvénients de l'utilisation des satellites comme collecteurs de données. En effet, les ballons stratosphériques sont moins coûteux à exploiter. Le géant GOOGLE a été l'un des pionniers de cette méthode avec le projet LOON [56]. En effet, ce projet est utilisé pour aider à couvrir des zones isolées qui n'ont pas d'accès à la connexion 3G/4G. Une couverture de 40 kilomètres à la ronde est assurée par un seul ballon positionné dans la stratosphère avec une autonomie de plus de 180 jours [5].

Le désavantage d'utiliser des ballons gonflables est que ces derniers sont sujets aux accidents et aux collisions [6].

— **Les UAVs (Drones) :**

Ces dernières années, l'utilisation des drones a été largement répandue pour la collecte de données, car ils offrent une solution aux différents inconvénients présentés pour les types de puits mobiles précédents. En effet, le système de navigation des drones est plus souple que celui des ballons stratosphériques, son coût de déploiement est plus économique que celui des satellites et enfin, les drones n'ont pas de problèmes d'accessibilité qui est un obstacle pour les puits mobiles terrestres.

Cependant l'utilisation des drones présente aussi certaines contraintes [81]. En

effet, les drones sont alimentés par des batteries ce qui réduit leur autonomie et par conséquent réduit son rayon d'action d'une part. D'autre part, les drones sont dans l'incapacité de voler dans certaines conditions climatiques telles que les tempêtes de sables dans le désert ou les tempêtes de neiges, etc.

2.4 Collecte de données grâce aux UAV

2.4.1 Fonctionnalités et défis

L'un des principaux objectifs des applications WSN est d'extraire les informations significatives des données captées par les nœuds capteurs déployés dans une zone d'intérêt. Ainsi, ces données doivent être transmises à un puits pour être traitées et obtenir des informations significatives. Traditionnellement, la collecte de données était effectuée en plusieurs sauts. Les nœuds les plus proches du collecteur finissent par servir de relais pour les données d'autres nœuds qui sont à distance plus éloignée du collecteur. Par conséquent, ces nœuds consomment leur énergie beaucoup plus rapidement que ceux qui n'ont pas à tenir le rôle de relais. Lorsqu'un nœud vient à épuiser ses réserves énergétiques cela entraîne la déconnexion du réseau, et par conséquent une perte de couverture. Pour résoudre ce problème, la collecte de données avec des collecteurs mobiles a été introduite.

Les collecteurs mobiles traditionnels se déplacent généralement au sol avec des vitesses et des conditions de mouvement limitées [74]. Il est difficile d'utiliser les nœuds mobiles traditionnels dans les zones difficiles (telles que la montagne enneigée, la forêt sauvage, etc.). Les UAV deviennent un meilleur choix pour de telles applications en raison de ses conditions étendues et flexibles. En tant que nœud de communication dans WSN, les principales fonctionnalités de l'UAV sont :

- **La collecte de données** : La collecte de données traditionnelle est basée sur l'hypothèse que les réseaux de capteurs sont denses de façon à ce que deux nœuds capteurs quelconques puissent communiquer grâce à des communications directes ou multi-sauts. Dans ce cas, la consommation énergétique est un facteur crucial dans la conception de protocoles pour ces réseaux. La mobilité a été introduite pour résoudre le problème de goulot d'étranglement. Cependant, lorsque les nœuds capteurs sont déployés dans des zones dangereuses ou inaccessibles par voie terrestre il devient difficile de récupérer les données captées. C'est dans ce contexte de l'utilisation des UAV a été introduite pour collecter

les données. En effet, les UAV peuvent être utilisés pour survoler les noeuds capteurs et récupérer leurs données.

- **Le maintien de la connectivité** : La connectivité est l'un des principaux problèmes dans les WSN car lorsque les noeuds tombent en panne cela entraîne une déconnexion partielle ou totale du réseau. Dans ce genre de cas, il est nécessaire d'assurer une connexion fiable pour garantir la connectivité en utilisant d'autres types de noeuds, les UAVs en l'occurrence. En effet, les drones peuvent être utilisés pour couvrir des zones isolées et récolter leurs informations.

D'un autre côté, les UAV peuvent être utilisés comme relais mobiles [29] [99]. En effet, les communications entre les noeuds permettent l'échange et la mise à jour des informations en continu. Ces communications peuvent être altérées en raison de la portée limitée des communications radio sans fil ou de la présence d'obstacles. Dans ce cas, les UAVs sont utilisés pour relayer les signaux d'un emplacement à un ou plusieurs autres emplacements.

- **La localisation** : Généralement, les WSN sont déployés de manière dense et aléatoire dans le champ de capture. De fait la position des noeuds capteurs n'est pas connue à l'avance. Une première solution basique est possible qui est de placer les noeuds capteurs un à un dans la zone à observer, mais cela devient impossible lorsque le réseau est composé de centaines, voire de milliers de noeuds. Une seconde solution est envisagée, qui est de munir chaque noeud d'un dispositif GPS [37], ce qui offre une bonne précision de localisation. Cependant, cette dernière solution est très coûteuse et gourmande en énergie.

La troisième solution proposée est l'utilisation de véhicules mobiles pour la localisation des noeuds notamment les UAV. Ces derniers peuvent survoler les noeuds capteurs et envoient des messages de signalisation pour diffuser leur position géographique et ainsi les noeuds capteurs peuvent déduire leur position [111].

L'émergence de la technologie des drones leur a permis d'être utilisés pour effectuer diverses tâches dans le domaine des transports [87], de l'agriculture [76], de la santé [48] et de l'industrie [132]. En effet, les UAVs sont caractérisés par leur flexibilité, portabilité, leur coût réduit ainsi que leur praticité d'utilisation. Certaines caractéristiques additionnelles telles que le fait d'être sans fil, sans pilote et qu'ils opèrent à distance les rendent appropriés pour une utilisation dans des zones dangereuses ou difficiles d'accès pour les humains.

Cependant l'utilisation des UAV dans des applications WSN rencontre certaines contraintes dont :

- **Capacité de calcul et de stockage limitée** : Les UAVs ne peuvent pas exécuter d’algorithmes d’optimisation global tel que l’optimisation de sa trajectoire par exemple.
- **Endurance limitée** : Les UAV sont alimentés par batterie, ce qui fait que ces derniers ont une durée de vol limitée. Le drone doit donc avoir une trajectoire optimale de façon à couvrir le plus de noeuds capteurs possible.
- **Nécessité d’utiliser une radio identique que celle des noeuds capteurs** : Ce qui oblige souvent les drones à voler à une basse altitude afin de pouvoir communiquer avec les noeuds capteurs. Par conséquent, ils doivent naviguer dans des environnements avec de nombreux obstacles ce qui est une tâche difficile à surmonter [19].

Afin de palier à ces contraintes, le drone doit suivre une trajectoire optimisée pour pouvoir récolter le maximum de données, assurer une bonne connectivité tout en évitant d’éventuels obstacles. C’est dans ce contexte qu’est apparu un nouveau domaine de recherche qui est la planification de trajectoire que doit suivre le drone.

2.4.2 Planification de trajectoire

L’introduction de la mobilité dans le WSN apporte beaucoup d’améliorations, mais aussi de nombreux défis. En effet, cela pourrait réduire non seulement les délais de l’ensemble du réseau, mais également la consommation électrique des nœuds situés à proximité des puits, ce qui prolonge la durée de vie du réseau. Cependant, il reste encore des problèmes difficiles à résoudre. L’un des défis les plus importants de la collecte de données dans les WSN avec sink mobile est la planification de la trajectoire que doit parcourir ce dernier. Dans les applications WSN, un bon algorithme de planification de chemin peut servir à la fois le protocole MAC et le protocole de routage.

2.4.2.1 Objectifs et contraintes :

Les objectifs de la planification de trajectoires pour les UAVs mobiles sont listés ci-suit :

- **Couverture fiable du champ de capture** : Le chemin que prend le UAV doit couvrir l’ensemble des noeuds capteurs du réseau sans laisser de zones non visitées, car cela pourrait générer une perte d’informations.
- **Réduction de la longueur du chemin** : La longueur du chemin que doit suivre le drone doit être optimisée (réduite) afin d’économiser la consommation

énergétique et réduire le temps de collecte des données.

- **Maximiser la quantité et la qualité de données récoltée** : Le chemin du drone doit permettre de récupérer toutes les données captées par les noeuds capteurs du réseau. En raison de la limitation de durée de vie du drone, ce dernier peut ne pas être en mesure de récupérer toutes les données captées. C'est pour cette raison que l'algorithme de planification doit permettre au UAV de récupérer un maximum de données.

Le processus de planification du chemin des UAVs est conditionné par certaines contraintes, dont :

- **Contraintes géométriques** : Afin de faciliter la résolution de la procédure de planification du chemin du drone, certains travaux imposent une limite des mouvements des UAVs. Par exemple, les auteurs dans [79] considèrent la collecte de données dans un terrain accidenté. Afin de simplifier la procédure de collecte, ils sélectionnent des clusters heads placés en ligne droite, ainsi, les mouvements du drone ne sont autorisés que vers l'avant. Les auteurs de [113] [130] ont considéré des approches similaires à la seule différence que, dans leurs cas, les têtes de clusters sont placés respectivement en grille et en zigzag.
- **Contraintes Énergétiques** : L'algorithme de planification de trajectoire doit impérativement prendre en considération la contrainte énergétique des UAV. En effet, les drones sont alimentés par batteries. De ce fait, l'énergie embarquée est limitée, ce qui réduit le temps de vol et par conséquent réduit la distance que peut parcourir le UAV. La trajectoire générée doit permettre de visiter tous les noeuds du réseau avant de venir à bout d'énergie [130].
- **Contraintes de dynamique interne (Type de UAV)** : Le type de drone utilisé est différent selon le type de réseaux considéré. En effet, des drone quad(ou multi) rotor sont utilisés dans les réseaux à petite échelle car ces UAV sont capable de suivre des trajectoires complexes, sont plus flexibles et nécessitent moins d'entretien. Cependant, ces derniers n'ont pas une grande autonomie. D'un autre côté, pour les réseaux à plus grande échelle, les UAV à voilure fixe sont favorisés. En effet, ils ont une vitesse de croisière plus élevée, sont limités à une hauteur de vol limitée et une durée de vol plus élevée que le type précédent.
- **Contraintes de communication** : Les liaisons de communications peuvent être affaiblies ou perdues à cause de la présence d'obstacles qui causent une atténuation du signal [49]. Dans ce cas, il est nécessaire de pouvoir garantir que le UAV se trouve dans le rayon de communication des noeuds capteurs pour une

durée suffisante afin que ces derniers envoient leurs données aux drones. Cette contrainte peut être implémentée soit explicitement en fixant le temps pendant lequel le drone se trouve dans le rayon de communication d'un noeud [121], soit implicitement en proposant une trajectoire qui assure au drone de passer suffisamment de temps à proximité de chaque noeud [107].

2.4.2.2 Types de trajectoire

2.4.2.2.1 trajectoire contrôlée Dans ce type de schémas, le collecteur de données (UAV) suit un chemin prédéfini, la trajectoire est calculée à l'avance. En effet, le chemin du UAV est calculé avant que ce dernier ne commence son processus de collecte. En conséquence, le sink mobile suit des points définis jusqu'à atteindre le point final.

Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens, En effet, dans un premier temps, les travaux ont considéré des chemins définis de plusieurs formes. Les auteurs dans [79] par exemple ont considéré un chemin en ligne droite. Les têtes de clusters sont choisis de façon à former une ligne droite. Le UAV suivra par la suite ces points afin d'en récolter les données captées par les noeuds. Dans d'autres travaux, les auteurs de [58] ont déployé un réseau sur un champ circulaire de rayon R et ont envisagé deux protocoles de routage différents : - le protocole SS (dans ce protocole, le puits est placé au centre du champ de détection et ils prennent le chemin le plus court - le protocole MS (dans ce protocole, le récepteur est censé se déplacer autour du centre du champ de détection avec un chemin circulaire centré fixe, le chemin est basé sur le chemin le plus court du capteur au puits). Les auteurs de [130], quant à eux, ont considéré un chemin en zigzag. Le drone est expédié pour collecter les données directement des noeuds capteurs.

Dans [113], les auteurs ont proposé FPPWR (Fast Path Planning With Rules), cet algorithme est basé sur des divisions en grilles, c'est-à-dire : ils divisent le réseau en forme de grilles, par la suite, un nombre minimum de noeuds de tête dans chaque grille doit être sélectionné. Ce choix est fait de manière que tous les autres noeuds à l'intérieur de la grille soient couverts par au moins un noeud de tête. L'ensemble des noeuds de tête représente la trajectoire que l'UAV doit suivre. Ensuite, le processus de visite de tous les noeuds du point de départ à la position finale peut être considéré comme un problème classique du voyageur de commerce (TSP) où les grilles horizontales ont la priorité dans la planification du chemin. Mais l'algorithme FPPWR a quelques défauts. Premièrement, leur algorithme ne prend pas en compte le temps de division de la grille. Cependant, en pratique, cela prend beaucoup de temps. Le deuxième point est

que les nœuds principaux consomment beaucoup d'énergie dans l'agrégation de données d'autres nœuds, ce qui est une clé cruciale. Ces problèmes sont pris en compte dans [128], ils ont basé leur travail sur FPPWR, ils ont proposé Spiral Path Planning (SPP), ils visaient à calculer rapidement un chemin le plus court possible. Leur algorithme divise la zone de détection en plusieurs cercles, et le drone collecte les données une par une le long des cercles.

Dans un second type d'approches, le drone doit suivre un chemin prédéfini qui est, dans ce cas, calculé grâce à plusieurs méthodes afin de désigner les points à atteindre.

En effet, plusieurs méthodes ont été utilisées pour calculer ce chemin. Dans [107], par exemple, les auteurs ont considéré l'utilisation d'un drone pour collecter des données pour l'agriculture de précision. Les coordonnées des points de cheminement sont calculées avec un algorithme génétique itératif (GA) qui calcule une position de vol stationnaire optimale dans chaque parcelle. Nous comprenons la position de vol stationnaire optimale : la position où il y a plus de nœuds au sol couverts par le nœud aérien. Le but étant de choisir le chemin qui permet de récolter le plus de données.

La méthode des algorithmes génétiques a été aussi combiné avec d'autres méthodes afin de sélectionner les points formant la trajectoire du UAV. Les auteurs dans [122] ont également travaillé sur la minimisation de la consommation d'énergie dans WSN en utilisant un UAV comme puit mobile. Ils ont développé un mécanisme de planification de trajectoire de vol optimal en utilisant un algorithme bio-inspiré multi-objectif. L'objectif de leur travail est de déterminer la trajectoire de vol optimale pour les drones afin de maximiser la valeur des informations de détection recueillies et de minimiser le coût total en termes de temps de vol, de consommation d'énergie et de risque d'exploitation d'un drone dans des conditions environnementales données. La condition de planification de trajectoire de l'UAV prend en compte les informations environnementales suivantes : topologie géographique, emplacement, canal de communication sans fil et risque de vol. Ils ont proposé un algorithme évolutif qui utilise conjointement les algorithmes GA (Genetic Algorithm) et ACO (Ant Colony Optimization). Le champ du capteur est divisé en petites zones unitaires appelées cellules. L'algorithme comprend deux parties : premièrement, les points de détection optimaux sont dérivés pour collecter les informations détectées à partir de différents types de capteurs au sol, puis ils lancent le processus qui détermine la meilleure trajectoire de vol entre les points de détection voisins. Pour cette dernière étape, ils ont défini une fonction d'utilité qui prend en compte l'utilité de détection, l'utilité énergétique, l'utilité du temps et l'utilité du risque pour trouver une première trajectoire de vol. Cette première solution est

optimisée en utilisant conjointement les algorithmes GA et ACO.

Dans un autre travail les auteurs de [70] ont considéré cette fois l'âge des informations à collecter. Ils proposent des trajectoires optimales en terme d'âge des données. En effet, les deux schémas sont max-AoI-optimal qui consiste à minimiser l'âge des plus anciennes informations détectées par les noeuds capteurs et le second schéma qui est Ave-AoI-optimal et vise à minimiser l'âge moyen des données collectées. La méthode de programmation dynamique (DP) et d'algorithme génétique sont adoptés pour trouver les deux chemins optimaux.

Les auteurs de [63] visent à réduire la longueur de la trajectoire du drone et ainsi réduire sa consommation énergétique. Le problème de sélection des points par lesquels le drone doit passer est formulé comme un problème de couverture d'ensemble pondéré (SCP) résolu par un algorithme glouton. Ensuite, l'emplacement et l'ordre de traversée des points de collecte de données est optimisé par un algorithme amélioré Shuffled Frog-Leaping Algorithm (SFLA).

Certains travaux dans la littérature ont considéré l'utilisation de plus d'un UAV pour collecter les données captées. En effet, l'utilisation de plusieurs UAV peut aider à couvrir de plus grandes zones du fait que chaque UAV pourra prendre en charge une partie du champ de capture. Alejo et al ont présenté dans [11] une planification de trajectoire efficace pour la collecte de données WSN avec plusieurs UAV. Les auteurs ont présenté trois schémas différents de planification de trajectoire qui aident à guider de manière autonome les drones au cours de leur processus de collecte de données. L'objectif principal est d'aider à surveiller les zones difficiles d'accès. Dans ce cas, les drones doivent passer par un ensemble de way-points placés sur la zone d'intérêt et éviter certaines zones interdites et faire en sorte que les drones ne rentrent pas en collision entre eux. Les trois méthodes sont basées respectivement sur l'algorithme génétique (GA), l'arbre aléatoire à exploration rapide (RRT) et l'arbre aléatoire optimal à exploration rapide (RRT *).

Les auteurs de [23] ont aussi travaillé sur la proposition d'un schéma de collecte de données en utilisant plusieurs drones. L'idée est de sélectionner un ensemble de tête de cluster pour que les drones les utilisent comme point de passage lors de la collecte de données. Ils ont utilisé la méthode d'optimisation Salpswan pour sélectionner un ensemble optimal de têtes de cluster à charge équilibrée. Afin de choisir un chemin optimal et réduire le temps de collecte pour chacun des UAVs, une méta-heuristique basée sur l'évolution différentielle (DE) est utilisée.

2.4.2.2 trajectoire non contrôlée Dans ce type de schémas, le collecteur de données (UAV) n'a pas de chemin prédéfini, la trajectoire n'est donc pas calculée à l'avance. En effet, le UAV découvre son chemin au fur et à mesure que ce dernier commence son processus de collecte. Dans ce cas, la planification de trajectoire est appelé planification En-ligne.

Plusieurs travaux se sont concentrés sur la planification de trajectoire En-ligne du UAV pour la collecte de données. Les auteurs de [123], par exemple, se sont intéressés à la planification de la trajectoire des UAVs dans un environnement urbain à basse altitude. En effet, ces environnements sont caractérisés par la présence à la fois d'obstacles statiques et d'obstacles dynamiques (inattendus). Au cours de leur travail, ils conçoivent deux types de cartes d'index de sécurité. Une première carte statique, construite hors ligne utilisée pour modéliser les obstacles statiques dans la carte géographique et une seconde carte dynamique cette fois-ci qui est construite en ligne. Cette carte intègre des obstacles inattendus qui ne sont pas disponibles dans la carte géographique pendant le vol. La carte dynamique est construite grâce à la portée de détection et à la distance de sécurité de l'UAV. Ensuite, les auteurs ont développé une méthode conjointe de recherche de chemin (hors-ligne et en-ligne) pour résoudre le problème de planification de chemin multi-objectifs. En effet, leurs objectifs étant de réduire le temps de collecte tout en évitant les obstacles. La recherche hors-ligne sert à trouver le chemin le plus court pour collecter les données en évitant les obstacles statiques tandis que la recherche en-ligne est exploitée pour contourner rapidement les obstacles inattendus en se basant sur la carte dynamique. Les auteurs dans [118] ont proposé un travail dans le même contexte que précédemment. Dans leur cas, les obstacles statiques sont modélisés sur la base d'un ensemble fou intuitionniste (IFS). Un estimateur d'obstacles dynamique est développé en utilisant un arbre aléatoire à exploration rapide (RTT).

D'autres travaux se sont aussi basés sur des schémas hybrides (Hors-ligne, en-ligne) pour la planification de trajectoire du UAV. les auteurs de [126] ont proposé une méthode divisée en deux phases : Une première phase hors-ligne qui est exécutée avant que le UAV n'entame son vol et une seconde étape exécutée au cours du processus de collecte. Durant la première phase, la trajectoire du drone est d'abord déterminé sur la base du modèle de canal LoS probabiliste. Ensuite, cette trajectoire est ajustée de manière adaptative en manipulant les vitesses de vol des UAV le long de la trajectoire hors ligne optimisée, ainsi que la planification de la communication basée sur l'information instantanée sur l'état du canal et les quantités individuelles de données reçues de manière cumulative.

Les auteurs de [84] dans leur étude ont proposé une solution en-ligne pour la collecte de données en utilisant plusieurs UAVs. Cette solution vise à identifier les positions de l’UAV où la valeur des données collectées est maximisée. La solution proposée prend en considération plusieurs facteurs dont le type de capteurs, les données précédemment récoltées ainsi que de les connectivités du réseau de UAV. Afin d’obtenir les positions optimales dynamiques des UAV en temps réel, les auteurs ont utilisé l’algorithme d’optimisation en essaim de particule (PSO) qui de base sur les facteurs précédents pour réajuster les positions des UAVs à chaque instant.

Le tableau 2.1 résume les travaux proposés dans littérature :

2.4.3 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur les WSN statiques, leurs caractéristiques, leurs contraintes ainsi que leurs différents domaines d’utilisation. Par la suite, nous avons introduit les différentes méthodes d’optimisation de la consommation d’énergie dans les WSN. En effet, différentes méthodes sont expliquées dont le duty cucling, les méthodes hiérarchiques et enfin les méthodes basées sur la mobilité.

La seconde partie du chapitre est essentiellement concentrée sur la collecte de données dans les WSN notamment sur la mobilité du collecteur de données. En effet, comme nous l’avons cité plus haut dans ce chapitre, différentes entités mobiles peuvent être utilisées comme collecteur mobile de données. Nous citons les véhicules terrestres, les satellites, les ballons stratosphériques et enfin les UAV.

La troisième et dernière partie de ce chapitre a été consacrée à l’étude de l’utilisation des UAV pour récolter les données captées dans un WSN. Nous y avons établis les différentes fonctionnalités et défis de l’utilisation des UAV. Le principal défi des UAV dans des applications de WSN est la nécessité de planifier le chemin que doit suivre le drone. Cette partie du chapitre a apporté une étude de cet aspect des WSN mobiles avec un état de l’art détaillé.

TABLE 2.1 – Comparaison des schémas de collecte de données

schéma	N de sinks	mobilité	méthode utilisée	But
[79]	unique	contrôlée	Ligne droite	Minimiser la consommation d'énergie
[58]	unique	contrôlée	Cercle	Minimiser la consommation d'énergie
[130]	unique	contrôlée	zig-zag	Minimiser la consommation d'énergie
[113]	unique	contrôlée	Grille	Minimiser la consommation d'énergie
[128]	unique	contrôlée	Cercle	Réduire le temps nécessaire à la collecte des données
[107]	unique	contrôlée	GA	Maximiser la quantité de données récoltée
[122]	unique	contrôlée	GA+ACO	Maximiser la quantité de données récolter Minimiser le temps de vol et la consommation d'énergie
[70]	unique	contrôlée	GA+DP	Minimiser l'âge des données récoltées
[63]	unique	contrôlée	SFLA	Réduire la longueur de la trajectoire
[11]	Multiple	contrôlée	GA+RRT+RRT*	Réduire la longueur de la trajectoire et éviter les collisions entre les drones
[23]	Multiple	contrôlée	DE	Réduire le temps de collecte
[123]	unique	non contrôlée	/	Éviter les obstacles statiques et dynamiques
[118]	unique	non contrôlée	IFS+RRT	Éviter les obstacles statiques et dynamiques
[126]	unique	non contrôlée	/	Réduire la longueur de la trajectoire
[84]	multiple	non contrôlée	PSO	Réduire le temps de collecte

Chapitre 3

Méthode de clustering pour la collecte de données basées sur des UAVs

3.1 Introduction

Les progrès récents des capteurs sans fil et des véhicules aériens sans pilote ont créé de nouvelles opportunités de contrôle environnemental et de collecte de données aériennes à faible coût. L'introduction des drones dans les applications civiles pose de nouveaux défis aux autorités gouvernementales en charge de la sécurité des vols et de la gestion du trafic aérien. Ainsi, et pour être intégrés dans l'espace aérien national, les drones doivent démontrer le même niveau de sécurité que les avions pilotés. La planification de la trajectoire est l'une de ces exigences à prendre en compte et elle est considérée comme faisant partie intégrante de l'intégration de l'UAV dans l'espace aérien non séparé [120]. Les méthodes existantes de planification des trajectoires des drones se sont essentiellement concentrées sur la recherche de trajectoires pour éviter les obstacles. C'est également le cas pour de nombreux algorithmes génériques de planification de chemin. Nous nous intéressons à l'utilisation de drones pour la collecte de données dans les réseaux de capteurs sans fil. En fait, par rapport aux schémas classiques de collecte de données où tous les nœuds transmettent des données à un nœud récepteur qui nécessite à la fois une liaison fiable de bout en bout entre le puits et les capteurs et une énergie importante consommée par les capteurs pour transmettre les données, l'utilisation d'un collecteur de données mobile offre une meilleure économie d'énergie pour tous les autres capteurs et prolonge ainsi la durée de vie du réseau. Ce gain est plus important là où peu de nœuds de capteurs sont déployés dans un vaste

réseau. Dans presque tous les réseaux de capteurs sans fil, le puits est considéré comme une entité cruciale en termes de capacité de calcul, de capacité de communication et notamment de consommation d'énergie. C'est pourquoi le nœud récepteur est généralement attaché à une entité mobile telle que des véhicules terrestres qui peuvent se déplacer à l'intérieur du champ du capteur pour la collecte et la collecte de données. Ainsi, des économies d'énergie considérables peuvent être obtenues en utilisant un puits mobile dans le champ de capteurs. Dans ce cadre, [61] a identifié plusieurs avantages de la mobilité des puits dans le domaine des capteurs, à savoir l'amélioration de la durée de vie et de la couverture des capteurs, le débit et l'amélioration de la sécurité.

De plus, l'utilisation de drones dans une telle situation semble être plus efficace que les collecteurs de données mobiles au sol où les obstacles et le terrain montagneux pourraient entraver la réalisation de la mission. Les drones peuvent obtenir rapidement des données précises sur de vastes zones difficiles d'accès par voie terrestre. De plus, les données peuvent être collectées chaque fois que le besoin apparaît et facilement, par rapport à d'autres approches [40]. Pour résoudre ce problème, des recherches récentes ont étudié l'utilisation des UAV (véhicules aériens sans pilote) comme collecteurs de données dans les réseaux de capteurs sans fil à grande échelle [75] [114]. De plus, différentes études ont été menées dans le but de trouver les chemins optimaux d'un nœud mobile pour collecter des données. L'approche la plus connue pour la planification de chemin est d'utiliser la formalisation du problème par le voyageur de commerce (TSP) [82].

Ce travail présente un schéma de mission de collecte de données d'UAV qui utilise la décision multi-objectif pour générer le chemin de l'UAV. Une telle mission consiste à trouver un sous-ensemble de nœuds agissant comme des têtes de cluster dans le réseau de capteurs sans fil au sol et que le drone peut utiliser comme point de cheminement pour collecter les données.

3.2 Formulation du problème

Dans cette section, nous décrivons les différentes phases impliquées dans la communication des données dans un réseau de capteurs sans fil. Nous considérons une zone d'intérêt A où un ensemble de nœuds de capteurs sans fil au sol S sont déployés et un seul drone D faisant office de puits mobile. Fondamentalement, notre objectif est d'utiliser le drone pour récupérer toutes les données collectées par les capteurs. Une pre-

mière approche consiste à survoler tous les capteurs pour récupérer les données. Cette approche peut induire une longueur de chemin significative que le drone doit suivre. Cependant, il présente un avantage précieux, qui est un coût énergétique réduit pour le réseau de capteurs.

En effet, chaque capteur doit envoyer ses données directement au drone, lorsque ce dernier le survole. Aucun protocole de routage n'est requis au niveau du réseau. Cependant, étant donné que le temps de vol du drone est également limité en raison de la contrainte de la batterie, nous devons également limiter la durée du tour du drone. Dans ce cas, la deuxième approche consiste à élire un capteur spécifique comme puits et tous les capteurs doivent envoyer leurs données à ce puits. Ainsi, le drone peut récupérer toutes les données d'un nœud spécifique faisant office de tête de cluster. Malheureusement, même si cette approche préserve l'énergie du drone en réduisant fortement son temps de vol, elle peut augmenter la consommation d'énergie du réseau. En effet, les données doivent être acheminées via le réseau de capteurs vers le puits. Ce processus de routage augmente le nombre de paquets dans le réseau, et par conséquent, l'énergie dépensée par les capteurs, et plus particulièrement les capteurs proches du puits puisqu'ils concentrent tout le trafic.

De manière générale, l'augmentation du nombre de nœuds capteurs agissant comme tête de cluster entraîne une augmentation de l'énergie consommée par le drone et une diminution de l'énergie consommée par le réseau, et vice-versa. dans ce travail, deux objectifs sont fixés, à savoir :

1. Minimiser l'énergie consommée par les capteurs.
2. Minimiser la consommation d'énergie du drone en s'assurant que le chemin que le drone doit suivre à travers les têtes de cluster a une longueur minimale.

Afin de résoudre ce problème, nous commençons par le diviser en deux sous-problèmes. Tout d'abord, nous devons sélectionner les capteurs qui doivent agir en tant que têtes de cluster, puis calculer le chemin suivi par le drone pour couvrir ces têtes de cluster. Pour la sélection de la tête de cluster, nous utilisons un paramètre, appelé h , représentant le nombre maximum de sauts autorisés entre un capteur et la tête de cluster. Fondamentalement, si nous diminuons le nombre maximum de sauts, nous augmentons le nombre de clusters. En revanche, si nous augmentons le nombre maximum de sauts, nous diminuons le nombre de clusters.

Pour calculer le chemin du drone qui couvre toutes les têtes de cluster, nous proposons d'utiliser l'heuristique 2-opt. L'heuristique à 2-opt est un algorithme de recherche

locale simple pour résoudre le problème bien connu du voyageur de commerce.

3.2.1 Formation des clusters

Comme mentionné ci-dessus, notre premier objectif est de déployer le nombre minimum de têtes de cluster, de telle sorte que pour chaque capteur s il y ait une tête de cluster c , où la distance en termes de nombre minimum de sauts de s à c est inférieur ou égal à h . Ce problème peut être formulé comme un *problème de couverture par ensemble* comme suit :

$$\begin{aligned}
 & \text{minimiser} && \sum_{j \in S} x_j \\
 & \text{tel que :} && \sum_{j \in S} a_{ij} x_j \geq 1, \forall i \in S \\
 & && i \neq j, \\
 & && x_j \in \{0, 1\}, j \in S
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

où x_j et a_{ij} sont des variables binaires. Fondamentalement, la variable de décision x_j , $j \in S$ indique si un capteur j agit ou non comme une tête de cluster.

Enfin, chaque variable a_{ij} , ($\forall i, j \in S$) est égale à 1 si le capteur i est dans la zone de couverture h hop d'une tête de cluster j . Afin de calculer la distance en termes de nombre de sauts entre un capteur i et une tête de cluster j , nous appliquons la stratégie de chemin le plus court pour le graphe non orienté obtenu en considérant les capteurs comme des sommets et la possibilité de lien de communication entre capteurs comme arcs. Plus précisément, on considère l'existence d'un lien entre deux nœuds, dont l'un peut être la tête du cluster, si et seulement si les deux nœuds sont à portée de transmission l'un de l'autre.

Sur la base de cette formulation, nous pouvons dériver l'ensemble optimal CH^* de têtes de cluster à prendre en compte afin de garantir que chaque tête de cluster puisse être atteinte par un capteur avec un maximum de h sauts. Par la suite, nous pouvons dériver le réseau sous-jacent sous forme de graphe non orienté $G = (V, E)$, où chaque nœud est représenté par un sommet v dans V (où $V = S$) et E est l'ensemble des arêtes non dirigées désignant les liens de communication.

À partir du graphique précédent G nous constituons un nouveau graphe $G' = (V', E')$, en ajoutant un nouveau sommet virtuel représentant une super tête de cluster qui est directement connectée, avec des arcs non pondérés, à toutes les têtes de cluster

appartenant à l'ensemble CH^* . Ainsi, $V' = V \cup \{ch'\}$ et $E' = E \cup \{(n, ch') | \forall n \in CH^*\}$.

L'idée principale de cette transformation en graphe est de pouvoir dériver la stratégie de routage basée sur le chemin le plus court adopté dans ce travail. Cette stratégie est réalisée en appliquant par exemple l'algorithme Minimum Spanning Tree qui nécessite une source unique. Puisque nous fixons le même coût pour tous les arcs, le calcul du chemin le plus court de chaque capteur vers la tête de cluster la plus proche conduit à calculer le chemin le plus court de ce même capteur vers la tête de super cluster. Enfin, nous définissons l'ensemble P comme l'ensemble des chemins les plus courts pour tout v dans $\{V - CH^*\}$. Nous définissons également $P(v)$ comme les sous-ensembles de P où le nœud v est présent et le $P(e)$ comme les sous-ensembles de P l'arc e est présent. Ces deux sous-ensembles sont utilisés dans la section suivante afin de calculer le coût énergétique pour un clustering donné.

3.2.2 Modèle de consommation Énergétique

3.2.2.1 Modèle de consommation d'énergie des noeuds capteurs

Dans la plupart des travaux existants, la durée de vie du réseau de capteurs sans fil peut être définie comme l'intervalle de temps entre le déploiement initial et le moment où le réseau est considéré comme incapable de fonctionner comme il a été initialement conçu. Dans ce travail, nous considérons que le réseau de capteurs sans fil est inopérant lorsque le premier nœud de capteur a épuisé toute son énergie. En plus de la dernière hypothèse, nous définissons la consommation d'énergie à chaque nœud comme la somme de l'énergie consommée pour chacun des trois cas suivants :

1. Transmission de paquets : Nous considérons que l'énergie consommée par un capteur pour les rapports périodiques de paquets est égale à la quantité d'énergie utilisée pour le processus d'échantillonnage d'événement et la transmission des données liées à cet événement échantillonné. En gros, pour un capteur v , le rapport d'énergie consommée est égal à :

$$E_r(v) = E_s + E_{tx}(l) \quad (3.2)$$

où : E_s est l'énergie consommée pour la détection d'événement et E_{tx} est l'énergie consommée pour la transmission des paquets. Ce dernier représente le temps total passé en mode émission et dépend du nombre de paquets envoyés, et du temps nécessaire pour transmettre ces paquets. Par souci de simplicité, nous supposons

dans ce qui suit que la quantité d'énergie utilisée pour l'échantillonnage est négligeable par rapport à l'énergie requise pour la transmission de paquets.

2. Retransmission de paquets (Routage des données) : nous pouvons diviser la retransmission des paquets en deux étapes distinctes. Fondamentalement, un nœud commence par recevoir un paquet, et après avoir identifié le saut suivant, commence à transmettre ce paquet à ce dernier. Dans ce cas, l'énergie consommée par le nœud est égale à l'énergie dépensée pour recevoir le paquet à laquelle nous ajoutons l'énergie dépensée pour l'envoyer. Formellement, $E_f(v)$ peut être formulé comme suit :

$$E_f(v) = \sum_{i=1}^{|P(v)|-1} (E_{rx}(l) + E_{tx}(l)) \quad (3.3)$$

où $E_{rx}(l)$ correspond à l'énergie consommée par un capteur pour recevoir un paquet de taille l . Comme défini dans la dernière section, $P(v)$ est le sous-ensemble de P , où le capteur v est présent.

3. Sur-écoute de paquets : En raison de la nature de diffusion du support sans fil, les capteurs peuvent recevoir des paquets envoyés par d'autres capteurs dans leur portée de communication même s'ils ne sont pas les destinataires prévus de ces paquets. Ce phénomène, appelé sur-écoute de paquets, peut fortement diminuer l'énergie des capteurs. Une approche possible pour faire face à ce phénomène consiste à utiliser un mécanisme de Duty Cycling afin d'éteindre la radio et de ne pas recevoir ces paquets. Malheureusement, l'approche cyclique augmente le délai de livraison des paquets. dans ce travail, nous n'avons pas considéré de duty cycling et nous calculons l'énergie consommée par un capteur correspondant au cas où il écoute la transmission de tous les paquets dans son voisinage. Cette consommation d'énergie correspond au cas pessimiste et peut être formulée comme suit :

$$E_o(v) = \sum_{p \in P} \sum_{\substack{(u,w) \in p \\ u,w \neq v}} E_{rx}(l) \cdot v \in N(u) \quad (3.4)$$

$N(u)$ identifie l'ensemble de capteurs dans la plage d'écoute d'un capteur u et $v \in N(u)$ est une fonction caractéristique, qui est égale à 1 si le capteur v est dans l'ensemble $N(u)$, 0 sinon.

3.2.2.2 Modèle de consommation d'énergie du Drone

Comme indiqué plus haut, le critère décisif pour la planification des trajectoires des drones est la minimisation de la consommation d'énergie, qui est fortement liée au temps de trajet. Les calculs de consommation d'énergie sont spécifiques à chaque drone et sont généralement obtenus après des tests empiriques et sont inhérents à la puissance consommée par l'hélice.

Plusieurs méthodes existent dans la littérature permettant d'avoir un ordre de grandeur de la puissance d'une hélice, comme la théorie des éléments de pale (BET) et la théorie de Froude. Ces méthodes fournissent des résultats plus précis. Cependant, ils sont basés sur un certain nombre de coefficients qui ne peuvent être calculés qu'après expérimentation, comme le coefficient de poussée, le coefficient de couple, le coefficient de puissance etc. De plus, ces coefficients sont spécifiques à chaque type d'hélice à une vitesse de rotation et ne peut pas être utilisé pour d'autres types d'hélices [4].

À notre connaissance, la meilleure méthode pour calculer approximativement la consommation d'énergie du drone est d'utiliser des formules qui relient la consommation d'énergie à la vitesse de rotation et à la taille des hélices comme celle proposée par Abbott, Young et Boucher. dans ce travail, nous utilisons la formule d'Abbott, qui est définie comme suit :

$$P = 5.33 * 10^{-15} * Diam^4 * Pitch * N_t^3 \quad (3.5)$$

avec P en Watt, $Diam$ et $Pitch$ en inch, et N_t en tr/mn.

Cette formulation a été utilisée pour calculer l'autonomie de vol et la consommation électrique d'un vrai drone quad-copter de type *Phantom 3 Advanced*. Les résultats sont proches de ceux présentés par le constructeur. La puissance étant équivalente à la quantité d'énergie consommée par unité de temps, l'énergie consommée par les hélices pour assurer les forces nécessaires au vol peut être exprimée comme suit :

$$E_{flt} = \int P_{propeller}(t) dt \quad (3.6)$$

Et puisque nous considérons une vitesse constante, l'équation ci-dessus devient :

$$E_{flt} = P_{propeller} \times \frac{Path_length}{Speed} \quad (3.7)$$

TABLE 3.1 – Caractéristiques des capteurs CC2420

paramètre	Valeur
Rayon de communication	20 m
Capacité de la batterie	1000 mAh
Voltage	3.3V
Tx_Current	17.4mA
Rx_Current	18.4mA
longueur du paquet de données	26 bytes
Débit de données	250kb/s

3.2.3 Plannification de trajectoire du drone

Une fois que nous avons sélectionné les têtes de cluster, nous devons calculer le chemin que le drone doit suivre afin de collecter les données de ces têtes de cluster. dans ce travail, nous proposons d'utiliser l'heuristique 2-opt pour calculer ce chemin. Cette heuristique est un algorithme de recherche local conçu pour résoudre le TSP. Fondamentalement, cet algorithme commence par une solution réalisable et recherche de manière itérative une solution améliorée en supprimant deux arcs et en les remplaçant par deux arcs différents qui reconnectent le chemin et créent un nouveau circuit plus court.

3.3 Tests et Résultats

Dans cette section, nous évaluons le modèle proposé et notre objectif est de trouver le meilleur nombre de clusters à sélectionner afin de s'adapter à la capacité de vol maximale du drone.

Les différentes simulations ont été effectuées sous Python en utilisant le solveur Cplex afin de résoudre le problème de clustering.

Dans ce qui suit, nous étudions l'impact de la variable h sur la consommation d'énergie du réseau de capteurs et du drone. Nous avons effectué des tests en considérant une superficie de 100m x 100m. Ensuite, nous avons déployé au hasard 200 capteurs en utilisant le processus "Random Poisson Point Process" sur notre zone de détection. Nous avons également considéré que tous les capteurs ont la même capacité de portée de communication et la même énergie initiale (c'est-à-dire la capacité de la batterie). Pour cela, nous utilisons les valeurs énergétiques de la famille cc2420 [47], le tableau I résume les caractéristiques des capteurs :

TABLE 3.2 – Caractéristiques du DJI Phantom3 Standard Advanced

paramètre	Valeur
Capacité de la batterie	4480 mAh
voltage	15.2 v
speed	15m/s
Diamètre des hélices	23,87 cm
Pitch	10,92 cm

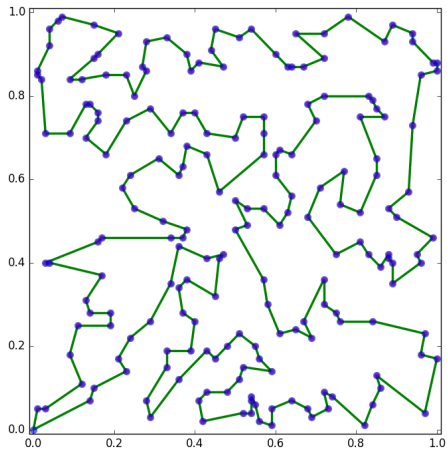
Afin de résoudre le problème d’optimisation des élections des têtes de cluster, nous avons utilisé le solveur Cplex. La complexité de notre problème étant uniquement liée au nombre de capteurs déployés dans la zone et puisque nous considérons la contrainte que chaque capteur doit atteindre au moins une tête de cluster, nous avons pu résoudre ce problème d’optimisation pour un nombre relativement important de capteurs. Après avoir choisi les têtes de cluster, nous utilisons les caractéristiques du DJI Phantom3 Standard Advanced comme référence pour calculer l’énergie consommée par le drone pour collecter les données [3]. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau II :

Les figures de la figure 1.a à la figure 1.f représentent le déploiement du réseau sur notre zone avec différentes valeurs de h . Comme nous pouvons le constater, le nombre de têtes de cluster (nœuds bleus) diminue lorsque nous augmentons h . On peut également remarquer que dans le même temps, la longueur du chemin que le drone doit emprunter pour collecter les données diminue également.

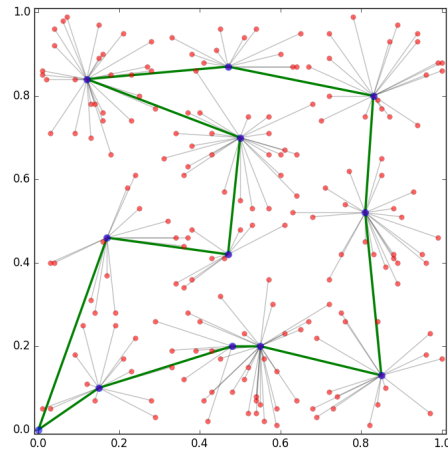
En effet, la figure 1.a. représente le déploiement du réseau en considérant $h=0$. Dans cette figure, nous constatons que tous les nœuds doivent agir comme des têtes de cluster. Cette contrainte interdit toute communication entre les capteurs. Chaque capteur ne collecte que les données environnementales et attend l’arrivée du drone pour envoyer les données collectées. Cela explique également pourquoi le drone parcourt un long chemin.

D’autre part, lorsque nous fixons h à 6, comme illustré sur la figure 1.f., nous n’obtenons qu’une seule tête de cluster. Dans ce cas, le drone se déplace vers cette tête de cluster unique et revient au point de départ. La présence d’une seule tête de cluster s’explique par le fait que le paramètre h est suffisamment grand pour ne permettre qu’à un seul nœud de recevoir les données captées par l’ensemble des capteurs du réseau et de les transmettre ensuite au drone. Dans tous nos tests, nous supposons que le drone démarre au point $(0; 0)$, visite toutes les têtes de cluster et revient au point de départ.

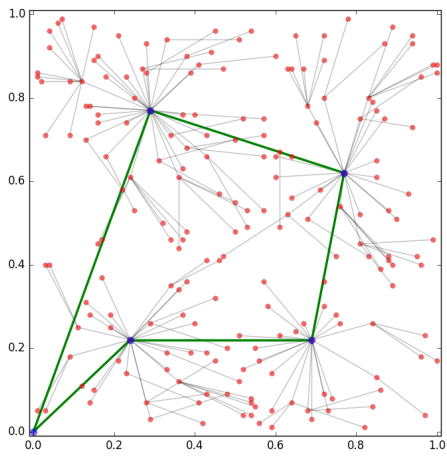
Afin d’évaluer la consommation énergétique du réseau, nous avons étudié son comportement en considérant l’énergie consommée lors de l’envoi d’un seul paquet de taille



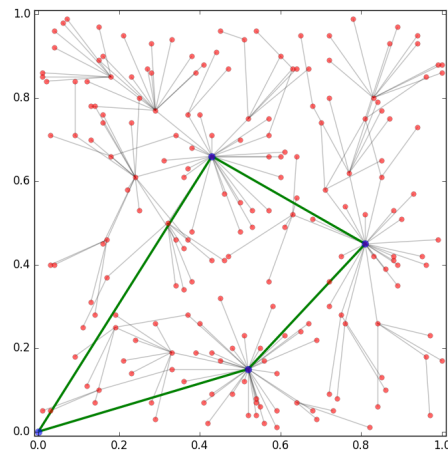
(a) $h = 0$



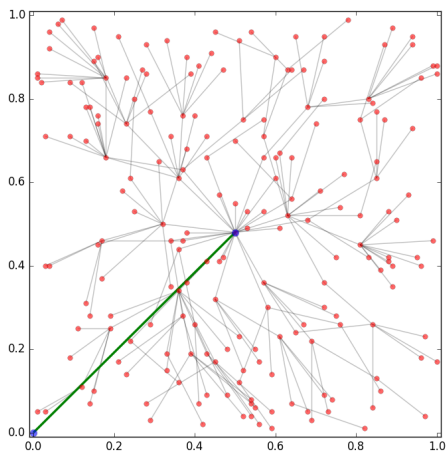
(b) $h = 1$



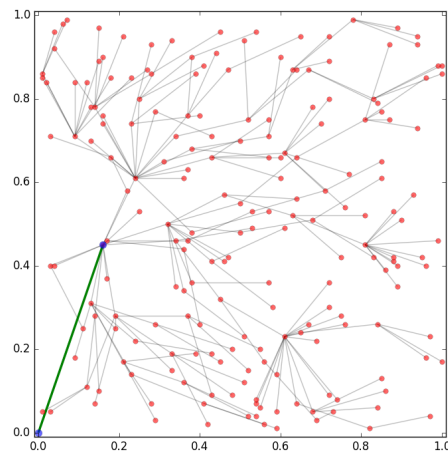
(c) $h = 2$



(d) $h = 3$



(e) $h = 4$



(f) $h = 6$

FIGURE 3.1 – Circuit du drone vs nombre minimum de sauts "h

26 octets. Nous avons ainsi fait varier le paramètre "h" de 0 à 9 pour observer son impact sur l'énergie consommée par les capteurs et le drone. Pour chaque valeur de h, une série de 20 itérations a été effectuée et nous représentons la moyenne de ces valeurs sur le graphique de la figure 2.

Le graphique de la Fig.2 montre l'évolution de la consommation d'énergie moyenne du réseau de capteurs et celle du drone. Ce graphique montre que la valeur de h influence fortement la consommation des capteurs, qui augmente en augmentant le nombre de sauts autorisés dans un cluster. Cela implique que le nombre de nœuds pouvant être attachés à une tête de cluster augmente. Ainsi, également le nombre de communications et d'échanges de données.

La consommation du drone est également influencée par le paramètre h. Ceci est illustré dans ce graphique par la décroissance de la courbe. Lorsque la valeur de h est égale à 0, la consommation du drone est au niveau maximum car, comme expliqué ci-dessus, le drone parcourt une longue distance afin de collecter les données. Lorsque nous définissons une valeur plus élevée pour le h, nous remarquons que le drone consomme moins d'énergie que dans l'exemple précédent. Nous concluons que la consommation d'énergie du drone est une fonction décroissante de h.

La valeur du paramètre "h" peut être choisie en fonction des différentes exigences. Si, par exemple, nous avons une grande capacité énergétique du drone et que les capteurs ont une petite batterie, nous pouvons alors utiliser une petite valeur pour le paramètre "h". Si, au contraire, le drone est limité en énergie et que les nœuds ont une batterie de grande capacité on peut fixer le "h" à une valeur plus élevée. Le point d'intersection des deux courbes peut être considéré comme un compromis pour équilibrer la consommation d'énergie des capteurs et du drone.

3.4 Conclusion

Dans ce travail, nous avons prédéfini un modèle simple, mais efficace afin de collecter des données à partir d'un grand nombre de capteurs à l'aide d'un drone. Il est clair qu'en raison du grand nombre de capteurs que nous envisageons, il n'est pas possible pour le drone de survoler tous les capteurs. Dans ce cas, nous proposons d'élire un sous-ensemble de nœuds qui doivent jouer le rôle de têtes de cluster. Les têtes de cluster sont en charge de collecter les données des capteurs. Après, le drone n'a qu'à collecter les données des têtes de cluster en calculant un tour qui survole toutes les têtes de cluster.

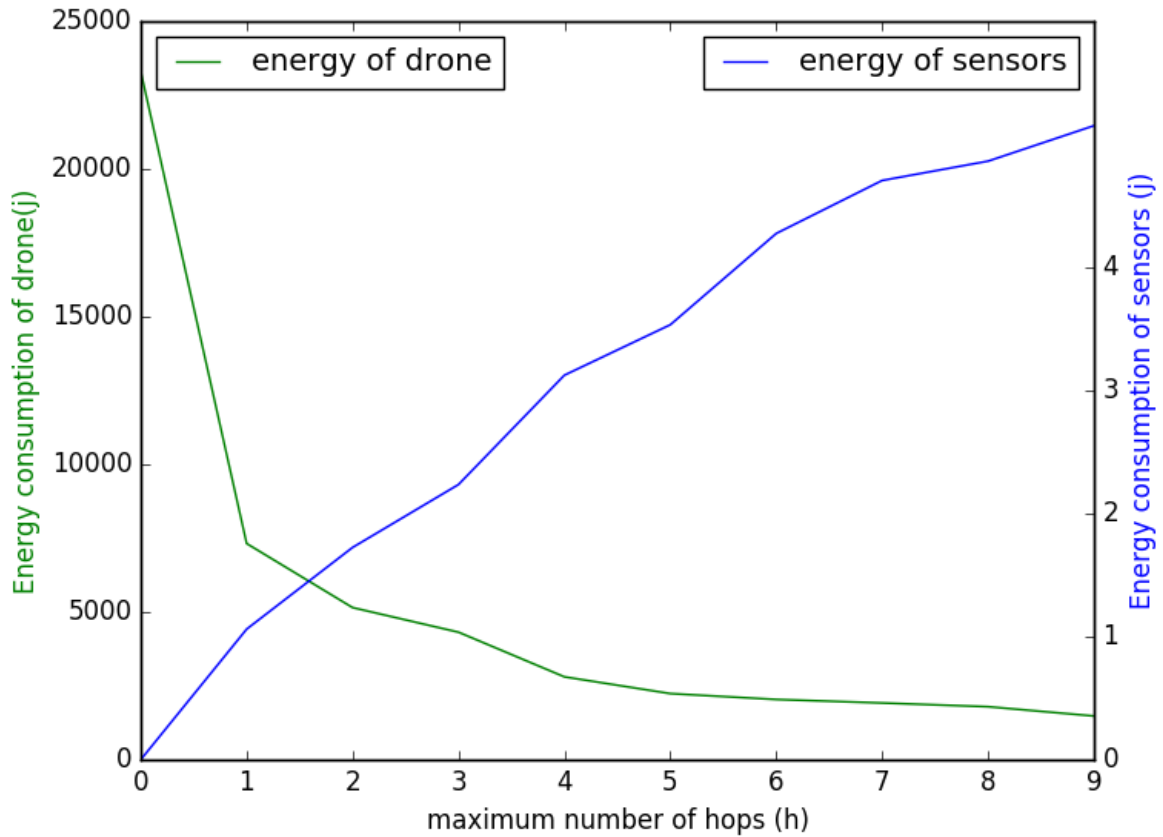


FIGURE 3.2 – Consommation d’énergie du drone VS consommation d’énergie des noeuds capteurs Vs nombre maximum de sauts (h)

Afin d’agir sur le nombre de têtes de cluster, nous considérons nombre maximum de sauts autorisés à un capteur pour atteindre des têtes de cluster comme paramètre. En diminuant le maximum de sauts, nous sommes en mesure d’économiser l’énergie du réseau de capteurs contre les drones et vice-versa. Les résultats obtenus montrent que nous pourrions obtenir un bon compromis en n’agissant que sur le maximum de sauts.

Chapitre 4

Méthode basée sur les champs potentiels artificiels pour la collecte de données

4.1 Introduction

Une des conséquences de la prolifération des capteurs sans fil est le développement d'équipements volants à faible coût et pouvant être utilisés pour une multitude d'applications civiles ou militaires. Ce nouveau type de capteur sans fil peut être utilisé dans diverses applications telles que le suivi des véhicules, la gestion du trafic, la détection d'incendie et l'assistance aux équipes d'intervention en cas de crise [112] [89] [7]. Ces capteurs mobiles sans fil sont capables de voler de manière autonome à différentes altitudes et sont généralement équipés d'unités pour surveiller l'environnement et communiquer pour échanger des données avec d'autres drones, capteurs au sol ou encore des stations centrales. Parmi les applications possibles figurent la collecte et la diffusion de données dans des environnements difficiles d'accès ou hostiles. En effet, un ou plusieurs drones peuvent être utilisés comme puits de collecte de données mobiles pour naviguer dans une zone où des capteurs sans fil sont déjà déployés. Dans ce cas, l'objectif du ou des drones est de collecter des informations de manière efficace et coordonnée [28] [36].

4.2 Motivation

Un UAV, communément appelé drone, est un avion sans pilote à bord. Le domaine d'utilisation le plus connu des drones est l'armée, mais l'intérêt que cette technologie a suscité ces dernières années a montré que ces drones peuvent être utilisés dans différents domaines tels que la sécurité et la surveillance de l'environnement [112] [89] [7], agriculture [131][13] et bien d'autres domaines.

Il existe deux méthodes pour contrôler le mouvement du drone. La première méthode consiste à utiliser une station de contrôle à partir de laquelle le drone est piloté manuellement. Le second s'appelle "Path Planning", dans cette méthode, le drone doit être capable de prendre des décisions pour trouver un chemin d'un point de départ à une certaine destination ou avec un objectif à travers un chemin sans obstacle [60].

La planification de chemin UAV a été utilisée avec de nombreuses autres méthodes telles que les algorithmes génétiques [71], les algorithmes A* [60] et les champs de potentiel artificiel (APF) [91]. La méthode APF est couramment utilisée dans la planification de chemin en raison de sa description mathématique concise et de son aptitude au contrôle en temps réel [72] [25].

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'utilisation d'une méthode de champ potentiel artificiel pour la collecte de données dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous partons de l'idée proposée par [91]. En effet, dans cette approche, ils utilisent un robot qui est en charge de collecter les données des capteurs WSN. Chaque capteur est une source de force attractive qui attire le robot. Le robot devra alors se déplacer vers le nœud qui émet le signal le plus fort (c'est-à-dire le nœud de capteur contenant le plus de données). Contrairement à la méthode de Pereira, dans notre travail, nous considérons des zones comme sources de forces attractives. A l'intérieur de ces zones peuvent se trouver plusieurs capteurs à la fois.

Le but de notre travail est de collecter le maximum de données tout en limitant la consommation énergétique du drone (son temps de vol).

4.3 État de l'art

Les champs de potentiel artificiel (APF) pour l'évitement d'obstacles des robots ont été utilisés pour la première fois par Khatib [59]. En bref, ce procédé consiste à doter la zone de détection d'un champ de potentiel artificiel, dans lequel les obstacles sont représentés par des forces répulsives qui repoussent le robot et l'empêchent de heurter

ces obstacles. Alors que le point de destination est modélisé par une force attractive qui aide le drone à atteindre l'objectif.

L'état de l'art pour la planification de trajectoire d'UAV à l'aide d'APF présente différentes utilisations de cette méthode[16].

Le suivi de la cible est l'une des applications de la méthode APF. Ces approches sont conçues pour trouver un nombre connu de cibles en mouvement dans un espace de travail. Dans [21], les auteurs présentent un système pour suivre une cible en mouvement à l'aide d'un essaim de drones sous l'influence d'un champ potentiel artificiel. Dans leur approche, ils choisissent un drone comme chef de file du groupe, ce chef étant doté d'une force d'attraction virtuelle pour maintenir l'essaim ensemble. Chaque membre du groupe a des forces répulsives pour éviter de se heurter. L'essaim de drones est sous l'influence de la cible mobile qui est dotée d'une force attractive pour aider le leader à atteindre la position cible. [119] a présenté un système dynamique de suivi de cible et d'évitement d'obstacles à l'aide d'un drone. Ce système est basé sur des champs potentiels et il est étendu pour prendre en compte non seulement la position relative de la cible mais aussi pour modifier la vitesse de l'UAV afin qu'il puisse la poursuivre.

Le deuxième cas d'utilisation de champs potentiels consiste à aider les robots (ou UAV) à atteindre un ensemble d'emplacements d'objectifs. Dans [72] les auteurs utilisent la méthode des champs potentiels pour la planification de la trajectoire de leur drone. Ils mettent à jour la méthode par une force de contrôle supplémentaire qui aide le drone à sortir d'un minimum local. Dans un premier temps, les auteurs rassemblent en un seul bloc des obstacles géographiquement proches les uns des autres pour éviter que le drone ne se bloque entre eux. Dans un second temps, ils définissent des points virtuels équipés de forces attractives qui aident l'UAV à éviter les points minima locaux. Dans [60], les auteurs présentent un système de navigation autonome pour les drones. Leur méthode est basée sur une combinaison de champs de potentiel virtuels et de l'algorithme A*. Les forces virtuelles sont utilisées pour mettre en place l'environnement, ou en d'autres termes, définir les obstacles et les objectifs. Tandis que l'algorithme A* est utilisé pour optimiser le chemin. Ainsi, ils étudient les performances de leurs différents algorithmes (le A* 3D, l'algorithme hiérarchique A* 3D et le recul Horizon A* 3D) en termes de temps de traitement et de distance parcourue par le drone.

Une autre étude [25] présente une méthode de planification de trajectoire d'UAV utilisant un champ de potentiel artificiel mis à jour par la théorie du contrôle optimal. Ils utilisent une méthode APF améliorée. Cette méthode est enrichie par l'introduction de forces de contrôle supplémentaires, basées sur les contraintes de performance (la

vitesse et l'accélération), la contrainte d'espace (le drone doit éviter les obstacles), les contraintes dynamiques (la relation entre la force, l'accélération, la vitesse et la position) et la condition aux limites (le chemin est représenté par un point de départ et un point cible).

Enfin, la méthode APF peut être utilisée pour explorer une zone afin de cartographier l'environnement. En effet, les auteurs de [50] présentent un algorithme de recherche coopérative qui vise à minimiser le temps de recherche. Les drones explorent l'environnement pour rechercher plusieurs cibles inconnues tout en évitant les obstacles. Les auteurs de [112] présentent les différents paramètres à prendre en compte lors de l'utilisation de champs potentiels pour des opérations de recherche et de sauvetage. Leur étude est principalement basée sur le temps, c'est-à-dire qu'elles visent à réduire le temps de découverte d'une cible (d'une victime lors d'une catastrophe naturelle par exemple). Dans une étude distincte, [91] propose une approche basée sur les champs potentiels qui vise à collecter les données du réseau de capteurs utilisant des robots mobiles. Ils considèrent un champ de capture constitué de nœuds capteurs et d'un robot dont la fonction est de circuler dans l'espace de travail afin de collecter les données capturées. Les auteurs considèrent que chaque nœud capteur est une source d'une fonction potentielle attractive, ce qui conduit à choisir la fonction de base radiale (RBF) centrée sur chaque nœud de capteur, ce choix est motivé par la possibilité de déterminer la région d'influence de chacune des forces. La fonction de coût que les auteurs utilisent est basée sur la quantité de données à récolter ; plus précisément, le robot se dirige vers les nœuds avec le moins d'espace disponible. Lorsque le robot se trouve dans l'espace de communication d'un nœud, l'espace disponible dans le buffer de chaque nœud est égal à la capacité du nœud dont est déduit l'espace occupé par les données capturées, en y ajoutant la quantité de données transférées au robot. En revanche, lorsque le robot est éloigné d'un nœud de capteur, l'espace restant est égal à l'espace initial moins l'espace occupé par les données détectées. Une fois les forces calculées, le vecteur direction à suivre par le robot est obtenu en additionnant tous les vecteurs au même vecteur de la force d'attraction la plus forte.

4.4 Définition du problème

Dans ce qui suit, nous considérons un drone D et un ensemble de m capteurs $N = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ déployés dans une zone de détection A . De plus, nous supposons qu'il n'y a

pas d'obstacles dans la zone considérée. Le drone est représenté par ses coordonnées $q_d = (x_d, y_d, z_d)$. On considère que les nœuds capteurs sont au sol, chaque nœud est représenté par ses coordonnées sur un plan 3D $s_i = (x_i, y_i, z_i)$, dans notre cas, la coordonnée de la 3e dimension de tous les nœuds est égal à "0".

Chaque nœud capteur possède plusieurs capteurs (température, humidité, etc.) et est capable de communiquer avec les autres nœuds du réseau ainsi qu'avec le drone via un dispositif de communication sans fil ayant une portée de communication r_i . Les nœuds capteur ont une capacité de stockage limitée notée $C_i : \forall i \in m$. Nous considérons que chaque nœud capteur est capable de capturer les données environnementales avec une fréquence de capture notée $g_i : \forall i \in m$ (différentes fréquences pour chaque nœud du réseau). Ainsi, la quantité de données collectées par un nœud capteur à un instant t est représentée dans l'équation suivante :

$$d_i(t) = g_i * t \quad (4.1)$$

Comme présenté précédemment, dans cet article, nous étendons le travail proposé par Pereira et al. Ainsi, comme dans [91], dans ce travail, nous visons à collecter autant de données que possible tout en minimisant à la fois le temps nécessaire pour collecter ces données et le temps de déplacement du drone. Pour atteindre cet objectif, notre drone devra se diriger vers la région présentant le maximum de données à récolter ou les zones contenant les nœuds ayant le moins d'espace de stockage disponible. L'espace restant c_i pour chaque nœud de capteur est estimé par rapport à la fréquence de transfert de données h_i ainsi que la distance entre les nœuds de capteur et le drone, comme illustré ci-dessous :

$$c_i(t) = \begin{cases} C_i - d_i(t) + h_i * t & \text{pour } \|q_d - q_i\| < r_d \\ C_i - d_i(t) & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.2)$$

Ainsi, la quantité de données stockées par chaque nœud capteur est alors égale à la capacité de ce nœud à laquelle on soustrait l'espace de stockage restant. La formule suivante résume cette propriété :

$$D_i = [C_i - c_i], 1 \leq i \leq m \quad (4.3)$$

Comme dans [91], nous utilisons des champs potentiels pour diriger le drone. Nous avons considéré que nous n'avons que des forces attractives et le drone sera attiré par le point qui émet la plus grande force d'attraction. Cependant, contrairement à [91], nous ne considérons pas que les nœuds capteurs sont les sources de forces attractives, mais tous les points possibles dans la zone de détection A . Par souci de simplicité, nous avons discrétisé cet espace en petites cellules hexagonales et le centre de chaque cellule est considéré comme étant une position possible du drone. Dans ce cas, le centre de la cellule est considéré comme une possible source d'une force d'attraction.

Selon ces dernières considérations, chaque point de la zone A est une destination possible du drone. Si le drone est placé sur ce point, nous devons calculer la quantité de données qui pourraient être collectées par le drone. Dans cet article, nous supposons que la quantité de données disponibles à chaque cellule est égale à la somme des données disponibles dans chaque capteur situé à un rayon maximal de r_d à partir de cette cellule.

Formellement, la quantité de données potentiellement récoltées dans chaque cellule est calculée par l'équation suivante :

$$Q_{data}(k) = \sum_{j \in V_k} D_j \quad (4.4)$$

où V_k est l'ensemble des cellules voisines de la cellule k et D_j est la quantité de données présentes dans chaque cellule.

4.5 Fonctions Potentielles :

Comme défini précédemment, la méthode VPF (Virtual Potential Fields) consiste en un champ de potentiel artificiel qui modélise l'espace de travail. Les obstacles sont modélisés par des forces répulsives tandis que le ou les buts sont représentés par une force d'attraction. Dans ce travail, nous considérons que notre espace de travail est représenté par une fonction potentielle où le drone est attiré par les cellules contenant le maximum de données. Nous utilisons la fonction de base radiale [95] définie pour chaque cellule du champ de capture. Avec cette fonctionnalité, nous pouvons gérer l'intensité de la force de chaque cellule et son rayon d'influence. La fonction utilisée est de la forme :

$$\phi_k(q_d) = \alpha_k e^{-\frac{1}{2F_k^2} \|q_d - q_k\|^2} \quad (4.5)$$

où :

k : désigne la k^{me} cellule hexagonale .

α_k : est l'amplitude maximale de la fonction.

P_k : est le rayon de base.

q_d : se réfère à la position du drone.

q_k : sont les coordonnées du point central des hexagones.

Dans ce cas, nous pouvons définir le gradient de la fonction comme suit :

$$\nabla\phi_k(q_d) = -\alpha_k \frac{\|q_d - q_k\|}{P_k^2} e^{-\frac{1}{2P_k^2}\|q_d - q_k\|^2} \quad (4.6)$$

Le rayon de base de cette fonction doit être défini de manière que la zone avec le plus grand nombre de données ait le plus grand rayon de base et les zones avec moins de données aient un rayon de base plus petit ; le calcul du rayon de base de chaque zone P_k est représenté par l'équation suivante :

$$P_k = \varepsilon[Q_{data}(k)] \quad (4.7)$$

De plus, l'amplitude de la fonction doit également être proportionnelle à la quantité de données présentes dans la cellule, et donc proportionnelle au rayon de base. Pour cela, comme dans [91], nous avons utilisé un paramètre b qui lie ces deux paramètres (α_k et P_k) suivant :

$$\alpha_i = p_i^b \quad (4.8)$$

Comme nous pouvons le voir, à mesure que la quantité de données augmente, le rayon de base et l'ampleur de la fonction augmentent, ce qui augmente la force d'attraction sur le drone.

Après avoir calculé la force de chaque cellule, le drone doit alors se déplacer vers la zone qui a le plus grand rayon de base (la plus grande force d'attraction). Il devra suivre un vecteur v :

$$v = \max(\nabla\phi_i(q_d)) \quad (4.9)$$

Enfin, en suivant le vecteur ayant la force maximale, le drone récolte les données en route vers le point de destination. La quantité de données collectées à un instant t est égale à la somme des données trouvées sur le trajet du drone.

4.6 Tests et Résultats

Dans cette section, nous évaluons la performance de notre approche. Notre objectif est de collecter le maximum de données tout en minimisant à la fois le temps nécessaire pour collecter ces données et le temps de trajet du drone. La première étape consiste à diviser le réseau en cellules hexagonales, comme le montre la figure 4.1. En effet, la figure montre que notre espace de travail est divisé en cellules hexagonales, les petits triangles en rouge représentent les nœuds capteur et le point rond en jaune représente le drone. Une cellule est délimitée par la ligne verte. On observe qu'une zone est centrée sur la position du drone et a la taille du rayon de communication du drone.

La deuxième étape consiste à définir et à calculer les fonctions potentielles de chaque cellule et, enfin, que le drone suive la plus grande force.

Nous avons effectué quelques tests, en considérant une superficie de 250m x 250m que nous avons divisé en un ensemble de cellules hexagonales de 34x29 cellules. Nous avons déployé des capteurs en utilisant le Random Poisson Point Process sur la zone de détection. Le drone était initialement positionné aux coordonnées $(0, 0, 0, 0)$. Enfin, nous considérons 50 nœuds de capteurs déployés aléatoirement dans A .

Nous considérons que tous les nœuds capteurs ont la même portée de communication, la même énergie initiale (capacité de la batterie) et les mêmes capacités de stockage initiales. Concernant le modèle de consommation d'énergie, nous avons utilisé les valeurs énergétiques de la famille CC2420 [47]. Le tableau 4.1 illustre les caractéristiques des capteurs considérés.

Afin d'évaluer les performances de notre approche, nous comparons nos résultats avec les performances obtenues en utilisant l'approche proposée par Pereira et al. dans [91]. Nous avons calculé la quantité de données collectées par le drone lors de l'utilisation de chacune des deux méthodes. La figure 4.2 montre la quantité de données collectées par rapport au temps.

Nous notons que notre méthode offre de meilleurs résultats que la méthode de Pereira en termes de temps de collecte des données. Sur un intervalle de temps de 20 secondes,

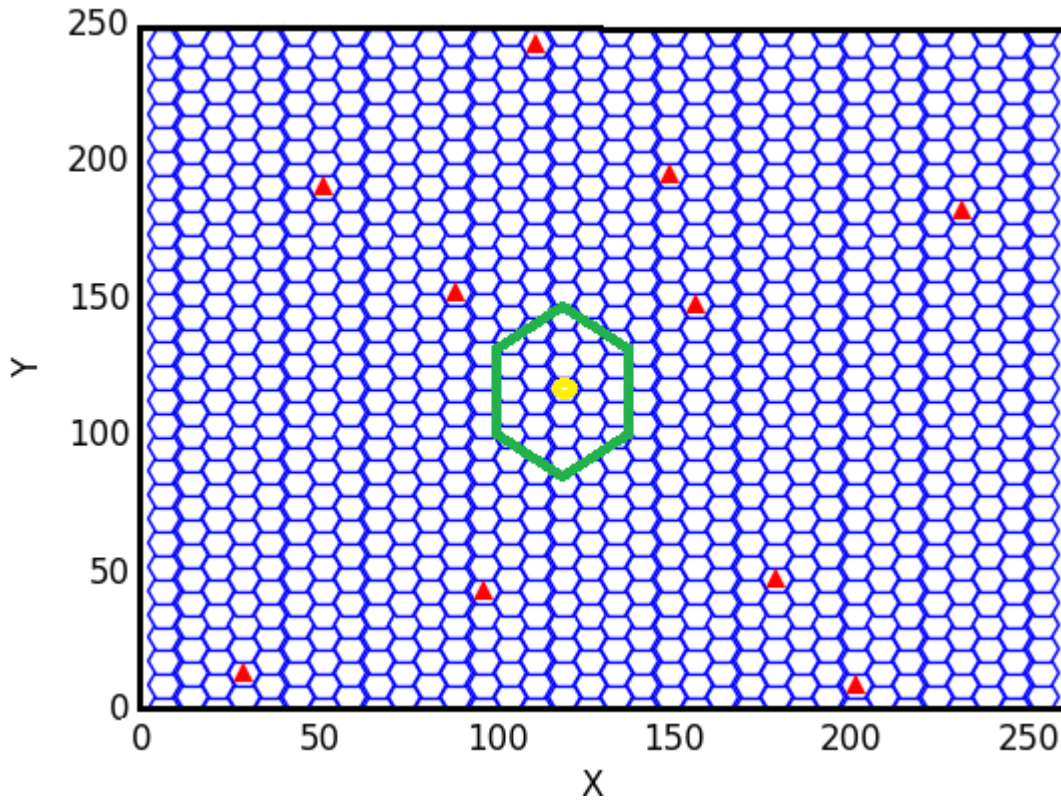


FIGURE 4.1 – Représentation de la division du champs de capture en cellules hexagonales

par exemple, nous constatons que lorsque nous utilisons la méthode de Pereira, la quantité de données collectées est égale à 3500 *Bytes* tandis que pour la même durée, en utilisant notre approche, nous avons pu récolter 5900 *Bytes*. Cela est dû au fait que le drone se déplace vers des zones où nous pouvons collecter les données de plus d'un nœud de capteur, alors qu'avec la méthode Pereira, le drone se déplace vers un nœud de capteur et ne collecte que les données de ce nœud.

Dans la figure 4.3, nous représentons la quantité de données collectées en fonction de la distance parcourue par le drone pour notre approche et celle de Pereira. On voit clairement que lorsque le drone parcourt de petites distances, les performances des deux algorithmes sont assez similaires. En effet, en parcourant jusqu'à 1000 *m*, les deux méthodes permettent au drone de récolter environ 2000 *Bytes*. Cependant, lorsque le drone parcourt une distance plus longue, la quantité de données collectées à l'aide de notre approche est bien plus importante. Par exemple, pour un vol de 5000 *m*, le drone récolte 10000 *Bytes* en utilisant notre méthode tandis qu'avec l'autre méthode, il ne

TABLE 4.1 – Caractéristiques du CC2420

Paramètres	Valeur
Rayon de communication	20 m
Capacité de batterie	1000 mAh
Voltage	3.3V
Tx_Current	17.4mA
Rx_Current	18.4mA
Longueur du paquet de données	26 octets
Taille du buffer	1000kilo Octets

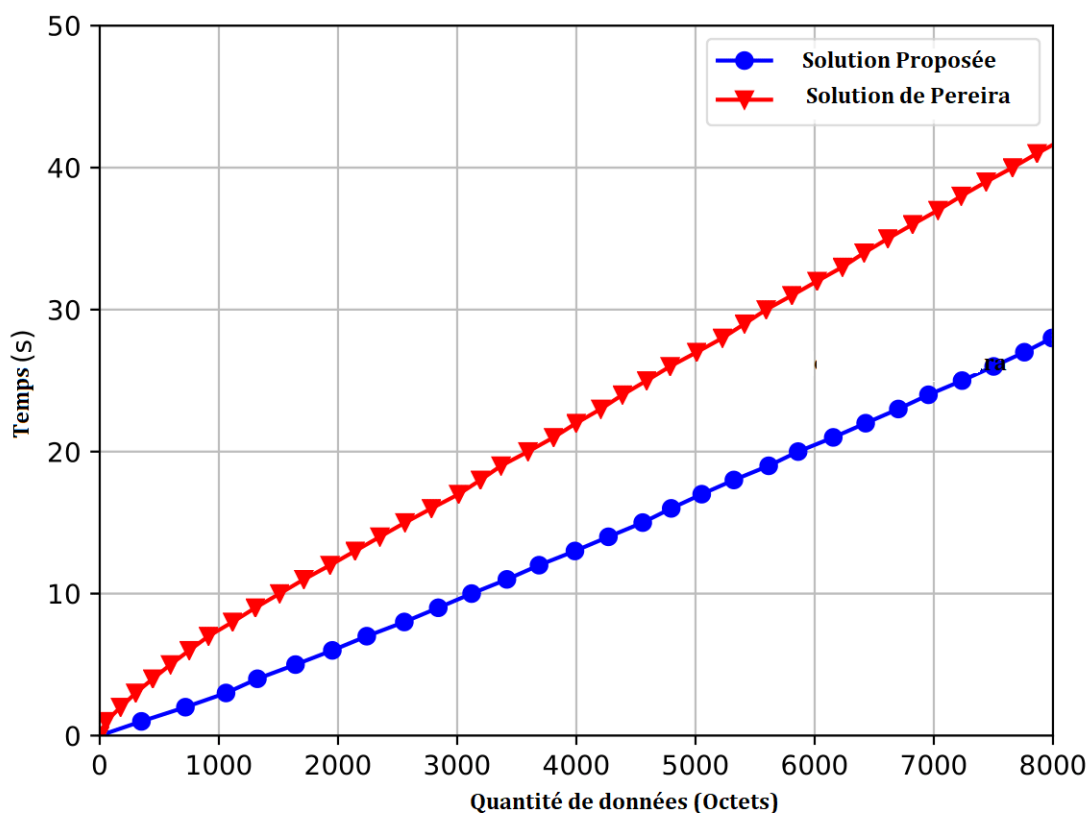


FIGURE 4.2 – Temps Vs Quantité de données

récolte que 5900 *Bytes*.

Dans la figure 4.4 nous traçons la courbe des distances parcourues par le drone pour collecter différentes quantités de données. Comme nous pouvons le voir, en utilisant la méthode de Pereira, le drone doit parcourir une plus grande distance pour collecter

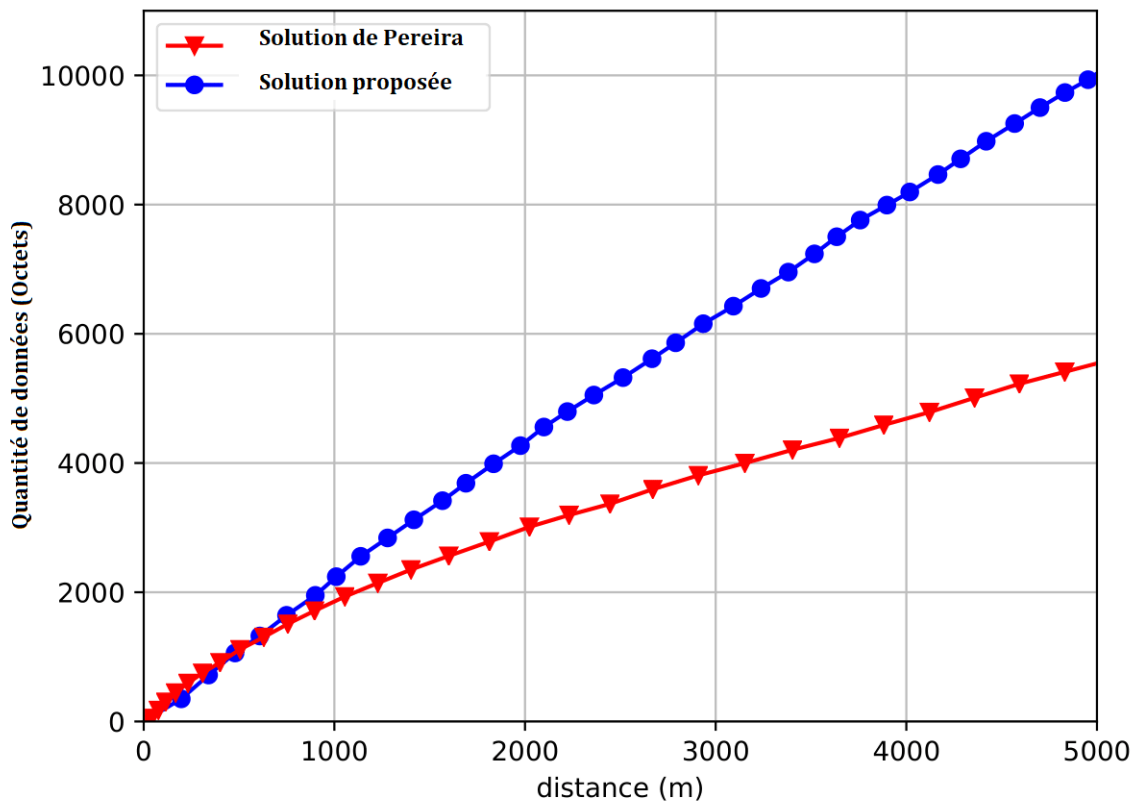


FIGURE 4.3 – Distance Vs Quantité de données

la même quantité de données que notre algorithme. Plus précisément, pour une petite quantité de données de 1000 *Byte*, le drone parcourt presque la même distance pour les deux méthodes. Cependant, lorsque nous augmentons la quantité de données à collecter, nous constatons qu'en utilisant la méthode de Pereira, le drone parcourt plus de deux fois la distance parcourue avec notre méthode.

Enfin, nous avons réalisé une deuxième série de simulations où nous avons fait varier le nombre de nœuds de capteurs au sein du réseau (de 10 capteurs à 100 capteurs), et nous avons calculé les distances nécessaires pour collecter les données. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 4.5. Comme on peut le voir, l'augmentation du nombre de capteurs entraîne une diminution de la distance parcourue. Par exemple, en utilisant la méthode de Pereira et pour 10 nœuds de capteurs, le drone doit parcourir près de 16 *km* pour collecter 8000 *octets* tandis que pour 50 nœuds de capteurs, la distance est réduite à 9 *km*. D'autre part, en utilisant notre méthode et pour 10 capteurs,

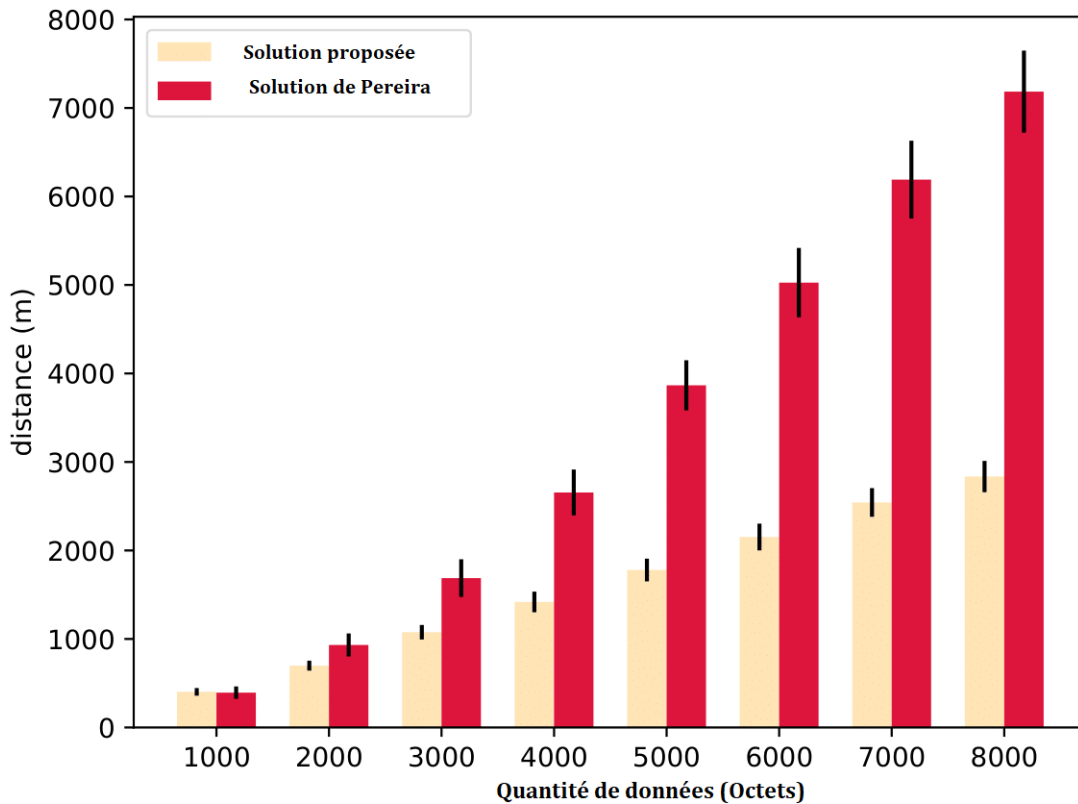


FIGURE 4.4 – Histogramme de comparaison entre les différentes distances parcourues par le drone pour collecter différentes quantités de données

le drone doit parcourir 10 *km* pour récolter cette quantité de données. Lors de l'utilisation de 50 nœuds de capteurs, la distance est réduite de plus de moitié. En comparant les deux méthodes, nous constatons que notre méthode fournit de meilleurs résultats en termes de distance parcourue pour les différents nombres de nœuds de capteurs dans le réseau. Les distances parcourues en utilisant l'algorithme de Pereira sont presque deux fois celles parcourues en utilisant notre méthode.

Pour conclure, d'après nos simulations, nous avons constaté que notre méthode apporte une amélioration des performances par rapport à la méthode proposée par [91], en termes de distance parcourue et de quantité de données collectées.

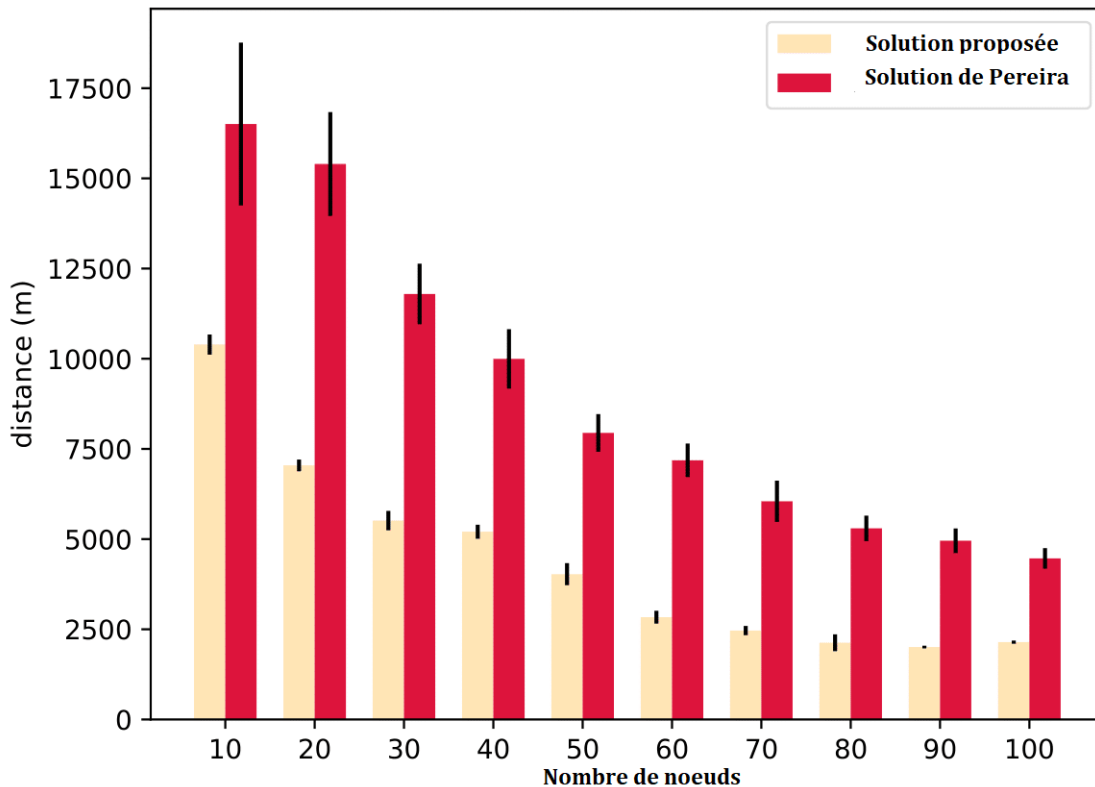


FIGURE 4.5 – Nombre de noeuds capteurs vs distance parcourue

4.7 Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté un modèle simple basé sur le champ potentiel pour collecter des données à l'aide d'un drone. Nous utilisons comme point de départ l'idée utilisée par Pereira et al. [91]. Cependant, nous étendons ce travail en considérant que chaque cellule de la zone applique une force attractive sur le drone, pas seulement sur les capteurs déployés. Nous avons comparé nos résultats à ceux obtenus avec la méthode de Pereira et nous avons obtenu de meilleures performances en termes de temps de collecte des données. En d'autres termes, pour la même période, notre méthode collecte plus de données. Le deuxième avantage de notre approche est qu'elle conduit à une réduction significative de la distance que le drone doit parcourir.

Dans les travaux futurs, nous avons l'intention d'étendre cette approche en déployant plusieurs drones pour collecter les données. Cela introduira un nouveau défi à ce pro-

blème, car nous devons également prendre en compte les forces répulsives afin d'éviter les collisions entre drones.

Chapitre 5

Stratégies dynamiques pour la collecte de données

5.1 Introduction

En règle générale, de nombreux petits appareils (nœuds) composent un WSN. Ces nœuds capteurs peuvent être disséminés sur une zone large ou hostile. Dans ce cas, la collecte de données devient l'un des problèmes importants ; ainsi, la connexion à chaque nœud de capteur et la récupération des informations à temps présentent de nouveaux défis.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, l'approche classique consiste à déployer des puits statiques et les données sont transmises au point central à l'aide de communications sans fil multi-sauts. Il devient nécessaire de mettre en place des protocoles de routage qui aident à acheminer les paquets vers les nœuds de destination. Cette tâche est compliquée en raison de la nature dynamique de la topologie du réseau. En effet, lorsqu'un nœud capteur vient à manquer d'énergie où est détérioré par les conditions environnementales, cette dernière devient injoignable, entraînant une perte de connectivité dans le réseau.

De nombreuses solutions de routage pour les réseaux de capteurs sans fil utilisent des puits statiques pour la collecte de données [66, 77]. Dans ces approches, les nœuds capteurs proches du puits sont soumis à un trafic élevé. En effet, ils sont plus souvent utilisés que les autres nœuds capteurs et consomment donc plus d'énergie, car ils se chargent de la retransmission des paquets vers le puits.

Pour surmonter ce problème, des études plus récentes ont envisagé d'utiliser un puits

mobile pour la collecte de données dans les réseaux de capteurs sans fil [110, 39]. En fait, compte tenu de ces approches, le puits se déplace à l'intérieur du réseau pour être à portée de communication des capteurs, lui permettant de collecter directement les données de chaque nœud. La plupart des travaux de pointe envisagent une collecte de données au sol où les puits sont placés sur des robots ou des personnes [125] et même fixés sur des animaux [51].

Plus récemment, avec le développement de nouveaux équipements de vol à faible coût (également appelés drones ou UAV), les chercheurs ont envisagé de les utiliser comme puits mobiles pour collecter des données à partir de réseaux de capteurs sans fil [73, 80]. Ce type de WSN fait partie de la famille des réseaux de capteurs sans fil mobiles (MWSN), où les nœuds de capteurs sont placés à des emplacements fixes et le puits se déplace pour collecter les données détectées.

L'utilisation de puits mobiles dans le WSN apporte beaucoup d'améliorations, mais aussi beaucoup de défis. Cette méthode réduit les délais de transmission et de communication dans l'ensemble du réseau et contribue à diminuer la consommation d'énergie des nœuds situés à proximité des puits, ce qui prolonge la durée de vie du réseau. Bien que les récepteurs mobiles présentent de nombreux avantages, il reste des problèmes difficiles à résoudre, tels que la topologie et la fiabilité du réseau dynamique. L'un des défis cruciaux dans la collecte de données dans les WSN avec des puits mobiles est *la planification du chemin des puits* [22].

L'utilisation de drones comme puits mobile pour collecter des données à partir d'un réseau de capteurs sans fil au sol a été largement considérée dans la littérature [70] [122]. Malheureusement, la plupart de ces travaux proposent des stratégies de planification de chemin centralisées hors ligne avec une connaissance presque parfaite de l'emplacement ou de l'état des capteurs (c'est-à-dire énergie, quantité de données, fréquence de collecte de données, etc.). Dans ce cas, la trajectoire du drone est calculée à l'avance puis suivie par le drone. En revanche, et à notre connaissance, seul [84] a adopté une stratégie en ligne. Cependant, comme nous le verrons dans la section suivante, ils ne considèrent pas les mêmes objectifs que ceux que nous envisageons dans cet article.

Dans ce travail, nous proposons deux stratégies de planification de trajectoire pour aider le drone à se déplacer à l'intérieur du WSN et collecter les données détectées. Justement, pour sélectionner les différents nœuds à visiter, le drone attribue un poids prioritaire à chaque nœud du réseau. Ce poids est calculé à l'aide d'une fonction d'utilité basée sur les informations transmises par les capteurs au drone et se propage dans le WSN à l'aide du protocole de routage OLSR (Optimized Link State Routing). La

première stratégie est la Data-driven Data Gathering Strategy (DDG), et elle donne la priorité aux nœuds ayant la plus grande quantité de données dans leur mémoire tampon. Cette stratégie est plus adaptée aux applications où plus nous collectons de données, plus cela est bénéfique pour l'application. Peu importe si les informations collectées sont anciennes ou nouvelles. Dans la deuxième stratégie, appelée Time-driven Data Gathering Strategy (TDG), nous utilisons la quantité de données stockées dans les capteurs et l'âge de ces données pour sélectionner l'ordre dans lequel les capteurs seront visités. Cette seconde stratégie est plus adaptée aux applications pour lesquelles la fraîcheur des informations collectées est essentielle. Nous avons implémenté nos deux stratégies dans le simulateur OMNeT++ en utilisant le framework INET-MANET.

5.2 Motivation

Le principal point commun entre les travaux de pointe est qu'ils envisagent une approche centralisée, ce qui signifie que la trajectoire du drone est calculée à l'avance. En effet, ils supposent une parfaite connaissance des coordonnées, de la quantité de données et de l'énergie disponible à chaque nœud capteur déployé, ce qui n'est pas réaliste dans les applications réelles. La plupart de ces approches se concentrent sur la réduction de la longueur du trajet du puits mobile pour diminuer la consommation d'énergie sans tenir compte de la valeur des données recueillies ou de leur validité.

Les résultats obtenus par ces approches sont optimaux, mais, en revanche, ils ne sont pas dynamiques et ne sont pas flexibles aux changements éventuels qui peuvent survenir dans le réseau. En effet, dans ces cas, le drone ne peut pas être interrompu pendant son processus de collecte de données pour prendre en charge un nouvel événement.

Semblable aux approches hors ligne, dans nos solutions, le drone utilise une carte contenant la topologie du réseau pour choisir son prochain point de destination. Le drone reçoit les informations nécessaires pour construire cette carte en survolant un nœud de capteur. Cependant, la principale différence est que le drone apprend la zone détectée, y compris la topologie du réseau de capteurs sans fil et les statistiques des capteurs de manière en ligne en mettant régulièrement à jour ces informations pour permettre au drone de s'adapter aux changements possibles du réseau (fréquence de détection modification, défaillance de nœuds, etc.).

Dans notre travail, nous abordons le problème de la planification de chemin en ligne pure pour la collecte de données mobiles. Nous avons utilisé un véhicule aérien

sans pilote comme évier mobile pour maximiser les informations de capteur acquises et garantir la fraîcheur des données.

5.3 Formulation du problème

Nous sommes intéressés par l'utilisation d'un drone comme puits mobile pour la collecte de données à partir d'un réseau de capteurs sans fil au sol. Dans un premier temps, notre système est présenté, puis les modèles de consommation d'énergie considérés à la fois au niveau des capteurs et du drone sont définis ; enfin, le modèle de communication liant les capteurs et le modèle de communication utilisé entre les capteurs et le drone sont détaillés.

5.3.1 Présentation du système

Comme nous pouvons le voir sur la figure 5.1, une application de collecte de données utilisant un drone comme puits mobile est envisagée. Considérons une zone géographique carrée notée A et un ensemble de nœuds de capteurs sans fil statiques N déployés dans A . Chaque nœud capteur a une parfaite connaissance de ses coordonnées GPS. On considère que les nœuds capteurs sont équipés d'un certain nombre de capteurs physiques (température, humidité, etc.), leur permettant de collecter des données relatives à leur environnement immédiat. Ces données sont collectées selon une fréquence de capture notée $f_i : \forall i \in N$. On note $d_i(t)$ la quantité maximale de données pouvant être collectée par un nœud capteur donné i pendant une période de $\Delta(t)$. Chaque nœud de capteur a une capacité de stockage limitée notée C_i . En plus des capacités de détection, les nœuds de capteurs sont également équipés d'une interface sans fil pour communiquer entre eux. Nous désignons par r_i la portée de communication pour les nœuds capteurs et le drone. Enfin, nous supposons que la densité des capteurs et la portée de communication sont suffisamment élevées pour que le réseau obtenu forme un graphe connecté.

La collecte des données est réalisée à l'aide d'un drone faisant office de puits mobile ; il est déployé et peut se déplacer librement dans A . De plus, à chaque fois qu'il survole un ou plusieurs capteurs, il peut communiquer avec eux et collecter les données disponibles. La contrainte de batterie du drone est prise en compte en limitant la durée de vol. Ce dernier ne doit pas dépasser la limite d'autonomie de vol. Enfin, comme pour les nœuds capteurs, le drone est également équipé d'une interface sans fil pour communiquer avec

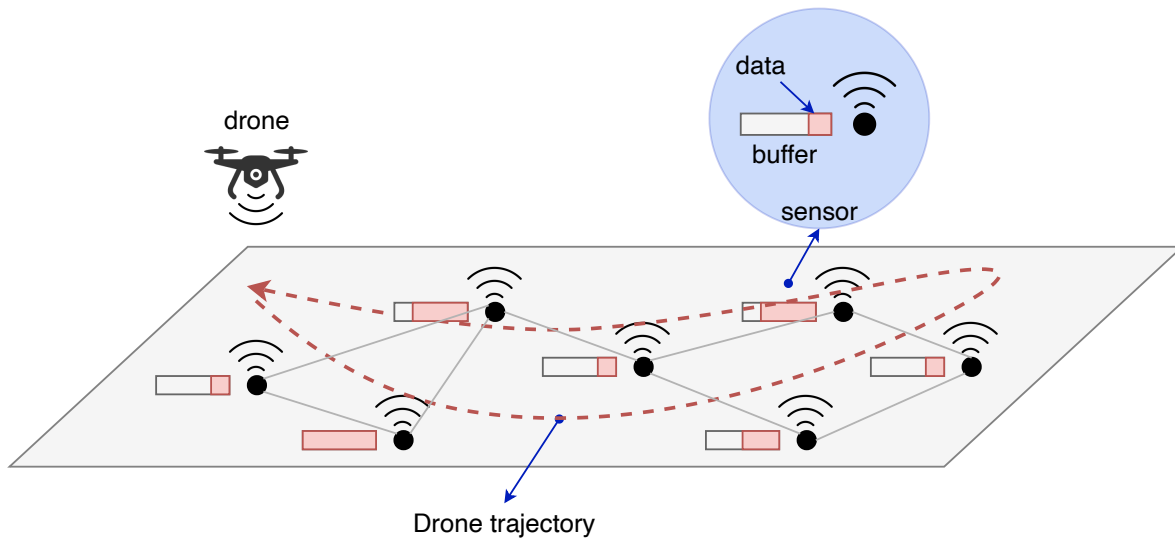


FIGURE 5.1 – Présentation du système.

les nœuds capteurs déployés au sol.

5.3.2 Modèle de consommation d'énergie pour les capteurs sans fil

De manière similaire à la littérature existante sur les modèles de consommation d'énergie des capteurs, dans cet article, nous considérons que la consommation d'énergie des nœuds capteurs est déterminée par le modèle radio et l'état émetteur/récepteur en utilisant des paramètres constants. Nous définissons l'énergie à chaque nœud comme la somme des énergies dépensées lorsqu'un nœud de capteur se trouve dans chacun des états suivants : *Idle*, *Busy*, *Switching*, *Receiving*, and *Transmitting*. Par exemple, lorsqu'un nœud capteur commence à recevoir un paquet de données, l'énergie consommée dans ce cas correspond à l'énergie dépensée pour faire passer la radio de l'état *Idle* à l'état *Réception* plus l'énergie correspondant au *textit*Réception jusqu'à la réception du paquet. De même, lorsqu'un nœud capteur commence à transmettre un paquet de données, l'énergie consommée correspond à l'énergie dépensée pour faire passer la radio de l'état *Idle* à l'état *Transmitting* plus l'énergie correspondant à l'état *Transmitting* jusqu'à la transmission du paquet. Le tableau 5.1 résume les paramètres de consommation d'énergie considérés dans ce travail.

TABLE 5.1 – Consommation électrique de l'émetteur/récepteur du nœud.

Node State	Value (mW)
Switching off-on	1
Idle	2
Busy	5
Receiving	10
Transmitting	100

5.3.3 Modèle de communication et protocoles

Comme présenté précédemment, une fonction d'utilité de collecte qui correspond à la priorité de collecte de données à partir d'un nœud de capteur donné dans le processus de collecte est définie. Chaque nœud de capteur calcule un poids utilisé par le drone pour sélectionner son prochain nœud de destination. Fondamentalement, il choisit le nœud de capteur de destination avec le poids le plus élevé. Comme on peut le constater, le drone a besoin d'être informé des poids associés à tous les nœuds capteurs pour prendre ses décisions. Pour apporter cette connaissance, le protocole OLSR et plus précisément ses messages de signalisation sont utilisés pour diffuser efficacement les poids de chaque nœud capteur vers tous les réseaux, y compris le drone.

Le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) [27] est un protocole de routage proactif initialement développé pour les réseaux ad-hoc. L'un de ses principaux avantages est qu'il hérite de la stabilité de la famille des algorithmes à état de liens et du fait que les routes sont immédiatement disponibles en cas de besoin, grâce à sa nature proactive. Dans OLSR, chaque nœud envoie périodiquement des messages de signalisation pour découvrir toute la topologie du réseau. Deux types de messages de signalisation sont utilisés : les messages HELLO et les messages TC (*Topology Control*). L'objectif des messages HELLO est de découvrir tous les voisins à 1 saut d'un nœud. À partir de ces informations, chaque nœud peut élire sa liste de nœuds de relais multi-points (MPR), qui consiste en une liste de nœuds à 1 saut qui offre les meilleurs itinéraires vers les nœuds à 2 sauts. L'étape suivante consiste à diffuser cette liste de MPR dans les messages TC en utilisant uniquement les nœuds MPR à tous les autres nœuds du réseau. Enfin, chaque nœud peut ensuite utiliser l'algorithme du chemin le plus court de Dijkstra pour trouver le meilleur itinéraire de chaque nœud accessible. Dans la version standard d'OLSR, la métrique utilisée pour trouver le chemin le plus court entre une

source et une destination est le nombre de sauts.

Dans ce travail, nous proposons de tirer parti d'un des points forts d'OLSR, qui est une diffusion optimisée des messages de signalisation au sein du réseau. Fondamentalement, chaque nœud de capteur intègre dans les messages de signalisation HELLO et TC des informations sur son état actuel, telles que sa position GPS ainsi que la quantité de données actuellement disponibles dans sa mémoire tampon. Cela permettra à chaque nœud de capteur au sein du réseau de construire la topologie du réseau en incluant ces informations. Après cela, lorsque le drone commence son processus de collecte de données, il envoie périodiquement des messages de balise pour signaler sa présence dans une zone. Si un nœud capteur au sol reçoit une de ces balises, cela indique que le drone est dans sa portée de communication. Par conséquent, le nœud capteur commence à transmettre au drone à la fois les données stockées dans sa mémoire tampon et sa vue cartographique du réseau, qui correspond à la topologie du réseau construite à l'aide des messages de signalisation de l'OLSR.

5.4 Stratégies de collecte de données

Dans cette étude, nous proposons de suivre une approche purement en ligne, ce qui signifie que le drone doit construire itérativement son chemin au fur et à mesure qu'il évolue dans la zone ciblée. Dans ce cas, il est essentiel de donner au drone la possibilité de sélectionner l'ordre de visite des nœuds capteurs. Pour ce faire, le drone commence par attribuer un poids correspondant à la priorité de chaque nœud capteur dans le processus de collecte. Par conséquent, le drone sélectionne le prochain nœud de destination avec le poids le plus élevé. Ce poids est obtenu selon une fonction d'utilité qui utilise les informations des nœuds capteurs et se propage dans le réseau, y compris le drone, à l'aide des messages de signalisation de l'OLSR. Dans ce qui suit, nous proposons deux stratégies : a.) **Stratégie de collecte pilotée par les données – DDG**, et b.) **Stratégie de collecte pilotée par le temps – TDG**. Dans cette section, nous présentons les deux stratégies et détaillons comment nous formulons la fonction d'utilité et modifions les messages de signalisation OLSR pour diffuser les informations requises par les deux approches.

5.4.1 Data-driven Gathering Strategy – DDG

Dans Data-driven Gathering Strategy – DDG, nous considérons une fonction d'utilité dérivée de la quantité de données stockées dans chaque tampon de nœud de capteur. Une priorité est donnée aux nœuds capteurs ayant la quantité de données la plus importante à collecter. Dans ce qui suit, nous fournissons plus de détails sur notre fonction d'utilité et sur la diffusion de l'information à l'aide des messages de signalisation OLSR.

5.4.1.1 Fonction utilité

Comme présenté précédemment, le drone émet périodiquement un message de balise pour annoncer sa présence dans la zone. Lorsqu'un nœud capteur reçoit cette balise, il commence à envoyer au drone les données stockées dans sa mémoire-tampon et une copie de la carte représentant sa vue de la topologie du réseau. Les derniers sont ensuite fusionnés et mis à jour avec la carte topologique disponible localement sur le drone. La carte résultante est ensuite utilisée pour calculer le poids associé à chaque nœud de capteur. Ce poids est appelé *poids d'attractivité* et est utilisé pour déterminer l'avantage (ou l'inconvénient) de voler vers un nœud de capteur spécifique dans le réseau. Dans Data-driven Gathering Strategy, nous proposons de calculer le *poids d'attractivité* comme suit :

$$A_i^t = \alpha_t \times \ln\left(\frac{Q_i^t}{C_i}\right) + (1 - \alpha_t) \times \ln\left(\frac{1}{\frac{d_i^t}{S_{max}}}\right) \quad (5.1)$$

où Q_i^t la quantité de données présentes dans le tampon du nœud capteur i à l'instant t , C_i est la capacité maximale du tampon du nœud capteur i , d_i^t est la distance entre le drone D et le nœud capteur i à l'instant t , S_{max} est la distance maximale autorisée par pas pour le drone, enfin, α est le facteur de poids.

Comme on peut le voir, l'attractivité d'un nœud capteur est déduite de la quantité de données disponibles dans la mémoire tampon d'un nœud capteur contrebalancée par la distance de déplacement nécessaire pour atteindre ce nœud capteur. En effet, la première partie de la formule ($\ln(\frac{Q_i^t}{C_i})$) attribue une plus grande valeur aux nœuds capteurs ayant la plus grande quantité de données dans leur mémoire tampon. Alors que la deuxième partie ($\ln(\frac{1}{\frac{d_i^t}{S_{max}}})$) attribue une valeur plus élevée aux nœuds capteurs les plus proches de le drone.

Le paramètre α permet de définir l'importance de la quantité de données collectées par rapport à la distance parcourue par le drone pour collecter ces données. Étant

donné que l'autonomie du drone se réduit dans le temps, le choix entre la quantité de données à collecter et la distance à parcourir devient crucial. Dans ce cas, nous proposons d'ajuster dynamiquement α en fonction de la distance maximale restante que le drone peut accomplir. Plus précisément, nous proposons de calculer α comme suit :

$$\alpha_t = 1 - \frac{D^t}{D_{max}} \quad (5.2)$$

où D^t est la distance totale parcourue jusqu'à présent par le drone et le D_{max} est la distance maximale pouvant être parcourue par le drone, qui se rapporte à son autonomie maximale.

Comme nous pouvons le voir, lorsque le drone démarre son processus de collecte de données, la distance parcourue est faible, ce qui signifie que α a tendance à être égal à 1. Cette valeur donne plus d'importance à la première partie de la formule 5.1, liée à la quantité de données. Le drone peut alors se déplacer vers les nœuds capteurs ayant la plus grande quantité de données stockées dans sa mémoire tampon même s'il se trouve à une grande distance du drone. En revanche, lorsque le drone poursuit son chemin de collecte, la distance parcourue augmente et la valeur de α est automatiquement ajustée en conséquence. Par conséquent, l'importance de la quantité de données devient moins importante par rapport à la distance. Cela conduit à introduire le facteur de distance lors du choix de la cible.

5.4.1.2 Diffusion de l'information

Comme mentionné ci-dessus, sur la base des informations diffusées par les nœuds capteurs, le drone peut construire son chemin de manière itérative en choisissant le prochain nœud capteur à desservir. Dans DDG, ces informations consistent en la quantité de données actuellement contenues dans chaque tampon de nœud de capteur et la distance séparant le drone de ce nœud de capteur. Pour diffuser les informations requises, nous enrichissons les messages classiques du protocole OSLR. Dans une première étape, chaque nœud capteur diffuse périodiquement dans son message HELLO à la fois la quantité de données et ses coordonnées GPS comme indiqué sur la fig. 5.2. Dans un deuxième temps, une fois les nœuds MPR sélectionnés, ils diffusent périodiquement leur message TC à tous les nœuds du réseau. Étant donné que les nœuds MPR connaissent désormais les informations de tous les nœuds capteurs qui les ont sélectionnés comme MPR, ils peuvent inclure ces informations dans le message TC, comme illustré sur la

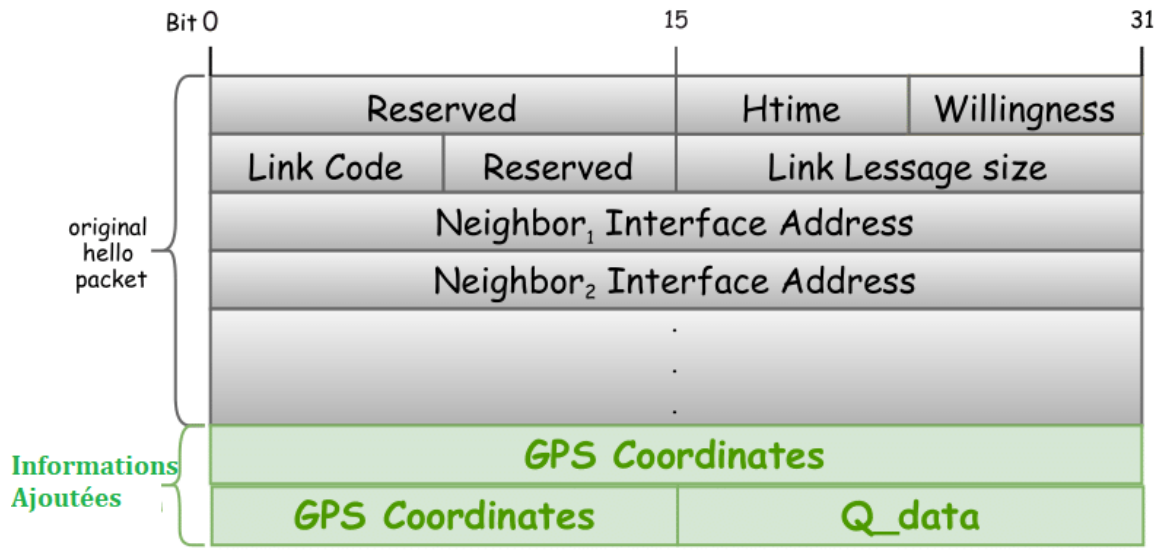


FIGURE 5.2 – Format du paquet Hello pour la strategie DDG .

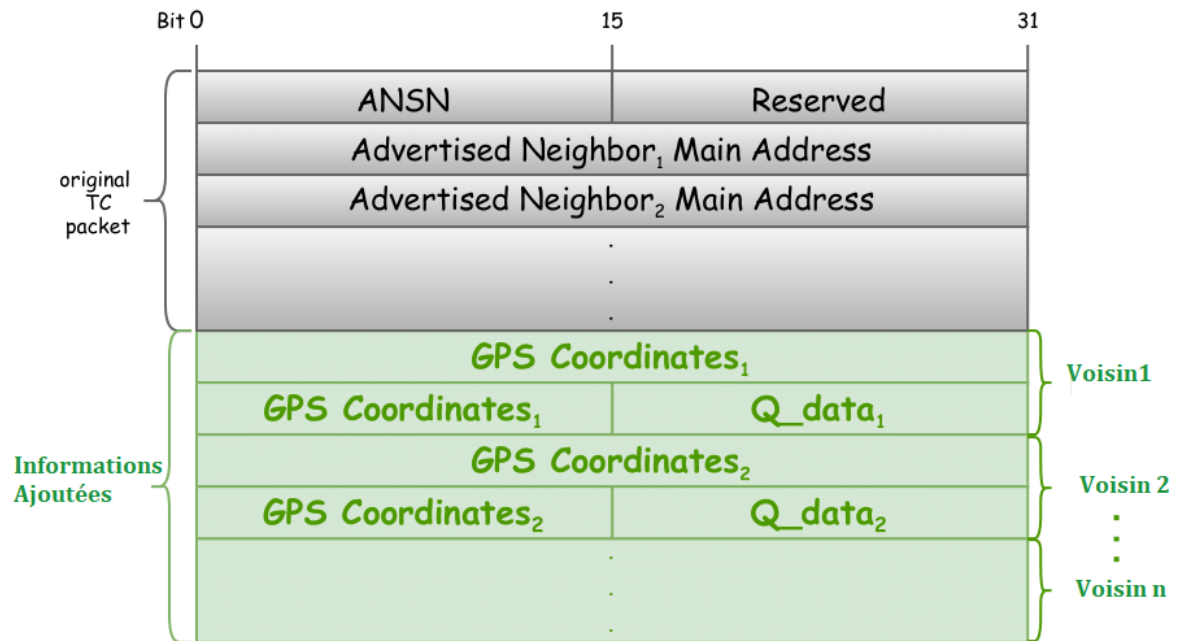


FIGURE 5.3 – Formatdu paquet TC pour la strategie DDG

fig. 5.3. La réception de ces messages TCs permet à chaque nœud capteur de maintenir une base de données contenant la topologie du réseau, y compris les coordonnées GPS et la quantité de données pour chaque capteur.

5.4.2 Time-driven Gathering Strategy – TDG

Dans Time-driven Gathering Strategy – TDG, nous supposons qu’une échéance est associée aux données de chaque capteur. Ce délai est une valeur de temps après laquelle les données ne sont plus considérées comme valides ou utiles. Dans ce cas, l’objectif est alors de collecter un maximum de données avant qu’elles ne deviennent inutilisables, ce qui signifie qu’une priorité est donnée aux nœuds capteurs ayant des données dans leurs buffers les plus proches de leurs échéances. Dans ce qui suit, nous fournissons plus de détails sur notre fonction d’utilité et sur la diffusion de l’information à l’aide des messages de signalisation OLSR.

5.4.2.1 fonction utilité

Comme pour la stratégie précédente, l’objectif de la fonction d’utilité est d’associer un *poids d’attractivité* à chaque nœud capteur. Cependant, au lieu d’utiliser la quantité de données disponibles dans la mémoire tampon de chaque nœud de capteur, nous considérons l’âge des données et en tenant compte du temps nécessaire pour atteindre le capteur ciblé. Car, une donnée peut être valide au moment de la décision, mais sa validité peut expirer lorsqu’elle attend l’arrivée du drone. Fondamentalement, nous proposons de calculer le *poids d’attractivité* comme suit :

$$A_i^t = \alpha_t \times \ln\left(\frac{a_i^t + \frac{d_i^t}{Sp_d}}{T_i}\right) + (1 - \alpha_t) \times \ln\left(\frac{1}{\frac{d_i^t}{S_{max}}}\right) \quad (5.3)$$

où a_i^t est l’âge des données valides les plus anciennes présentes dans le nœud de capteur i à l’instant t , T_i est l’âge auquel les données ne sont plus considérées comme valides pour le nœud capteur i , d_i^t est la distance entre le drone D et le nœud capteur i à l’instant t , Sp_d identifiant la vitesse du drone, S_{max} est la distance maximale autorisée par pas pour le drone. Enfin, α est un facteur de pondération.

Comme on peut le voir, cette fonction d’utilité est basée sur l’âge des données stockées dans le buffer des nœuds capteurs et sur la distance séparant ces capteurs du drone. La première partie de l’équation 5.3 vise à attribuer un score élevé aux nœuds dont les données approchent de leur échéance. Tandis que la deuxième partie attribue une plus grande valeur aux nœuds capteurs les plus proches du drone. Enfin, nous proposons de calculer le facteur de poids α de manière similaire à la stratégie précédente, en utilisant la formule 5.2. En effet, suivant la même logique, lorsque le drone commence

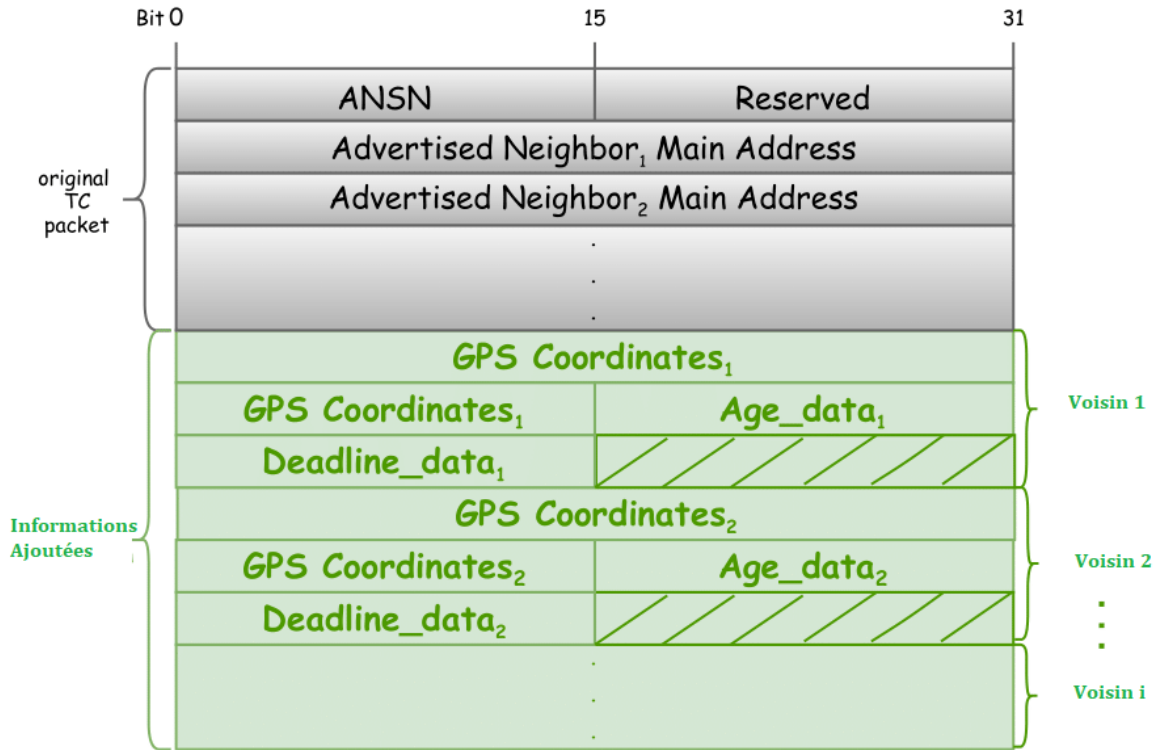


FIGURE 5.5 – Format du paquet TC pour la strategie TDG

5.5.1 Paramètres de simulation

Nous avons réalisé un ensemble d'évaluations de performances à l'aide du simulateur OMNeT++ [109]. Nous avons également utilisé le framework INETMANET [15], une bibliothèque de modèles open source pour l'environnement de simulation OMNeT++ qui fournit des protocoles, des agents et d'autres modèles pour les réseaux mobiles ad hoc. Nous avons considéré que les nœuds capteurs et le drone sont équipés d'interfaces de communication IEEE 802.15.4, leur permettant de communiquer. Tous les nœuds de capteurs ont les mêmes capacités en termes de taille de mémoire tampon et de rayon de communication. Enfin, nous avons modifié le protocole OLSR d'OMNeT++ /INET-MANET pour répondre à nos besoins de signalisation. Plus précisément, nous avons modifié le format des messages de signalisation HELLO et TC OLSR. Le tableau 5.2 résume nos paramètres de simulation que nous considérons dans nos évaluations.

En raison des fortes contraintes sur l'autonomie des drones, il n'est pas possible d'envisager des zones de tailles énormes. Par conséquent, il n'est pas possible d'envisager un grand nombre de capteurs qui pourraient être déployés dans la zone. Nous avons donc

TABLE 5.2 – Paramètres de simulation.

Parametre	valeur
Nombre de capteurs	50-100
Frequences de capture	10-15 Byte/s
Taille des buffers	5000 Bytes
Rayon de communication	200 m
Deadlines	500-700 s
Vitesse du drone	4 m/s
Fréquence d'envoi des messages HELLO	2 s
Fréquence d'envoi des messages TC	5 s

considéré une zone de 2km x 2km avec une densité de capteurs comprise entre 50 et 100 capteurs. Nous avons fixé la taille du buffer des nœuds capteurs à 5K octets, car ils ont des capacités limitées en termes de calcul et de stockage. La portée de communication des capteurs est fixée à 200 m pour garantir un graphe connecté puisque les capteurs ont besoin de diffuser leurs informations dans le réseau. Nous explorons trois catégories de candidatures : i) les candidatures à faible taux de collecte, ii) les candidatures à taux de collecte modéré, iii) et enfin, les candidatures à fort taux de collecte. Nous avons supposé un taux de collecte compris entre 1 et 5 octets/s pour la première catégorie d'applications, correspondant à une quantité de données comprise entre 6k et 18k octets par heure. Pour les applications avec un taux de collecte modéré, nous fixons le taux de collecte entre 5 et 10 octets par seconde (de 18k octets à 36k octets par heure). Enfin, nous fixons un taux de collecte compris entre 10 et 15 octets par seconde (36k octets à 54k octets par heure) pour les applications collectant une grande quantité de données. Nous pensons que nos choix nous permettent de couvrir un large spectre d'applications.

Dans cette étude, nous avons considéré un drone présentant les caractéristiques des drones actuellement disponibles sur le marché en termes de vitesse et d'autonomie de vol. Nous avons envisagé un drone avec une autonomie de 20 minutes ; par conséquent, nous avons décidé de fixer le délai à la moitié de cette durée, soit 10 minutes.

Enfin, les intervalles des messages HELLO et TC ont été fixés aux valeurs recommandées par la norme.

Suite à l'état de l'art présenté dans la section 2.4, nous considérons que les travaux

les plus proches de nos approches proposées sont ceux présentés dans [70], [122] et [84]. Quant à notre solution, le travail proposé dans [70] utilise l'âge des données pour optimiser la trajectoire du drone. Cependant, contrairement à notre approche, ils n'ont pas défini de date limite pour ces données, ce qui rend difficile la comparaison des deux propositions car elles ne visent pas à évaluer la même valeur d'utilité. Les auteurs de [122] ont défini une fonction d'utilité qui attribue un poids à chaque nœud capteur du réseau pour optimiser la trajectoire du drone. Les paramètres pris en compte dans leur solution sont la priorité du nœud, l'énergie des capteurs et du drone, et les zones interdites. Ces paramètres sont donc différents de ceux que nous avons utilisés. Cette différence signifie que nos deux solutions ne peuvent pas être comparées car elles n'ont pas le même objectif.

Contrairement aux solutions présentées dans cet article, qui sont des approches dynamiques, les deux approches mentionnées ci-dessus sont statiques et non flexibles pour un éventuel changement de réseau. La comparaison avec nos solutions ne peut être faite, car elles ne partent pas des mêmes hypothèses. Enfin, le travail présenté dans [84] est une approche similaire aux solutions présentées dans notre article. Ils présentent une solution en ligne qui utilise une fonction d'utilité pour ajuster la trajectoire du drone lors de son processus de collecte de données. Cependant, leur fonction est basée sur des paramètres différents de ceux que nous avons utilisés. Il est donc impossible de comparer nos résultats, car les méthodes ne visent pas à évaluer la même valeur d'utilité.

En raison de la grande diversité des approches et de la variété des critères expérimentaux et d'évaluation, aucune approche dans la littérature ne peut être considérée comme une référence de pointe hautement pertinente. Nous avons donc choisi de mettre en œuvre deux méthodes supplémentaires en plus de celles proposées.

Dans la première approche, nommée NDG (c'est-à-dire la stratégie de collecte de données la plus proche), le drone se déplace et collecte les données du nœud de capteur le plus proche à chaque étape. En d'autres termes, la fonction d'utilité utilisée pour sélectionner le prochain nœud capteur à visiter est basée uniquement sur la distance séparant le drone et les nœuds capteurs. L'autre approche avec laquelle nous avons comparé, nommée DDG-WIC (c'est-à-dire *Data-driven Gathering Strategy-Without Intermediate Collection*), est dérivée de notre stratégie proposée DDG. Fondamentalement, dans DDG-WIC, nous considérons la même fonction d'utilité que dans DDG, à l'exception du fait que le drone ne collecte aucune donnée des nœuds de capteurs intermédiaires se trouvant sur son chemin vers la destination ciblée. Cette approche correspond à des cas d'utilisation où l'altitude du drone ne lui permet pas de communiquer avec les

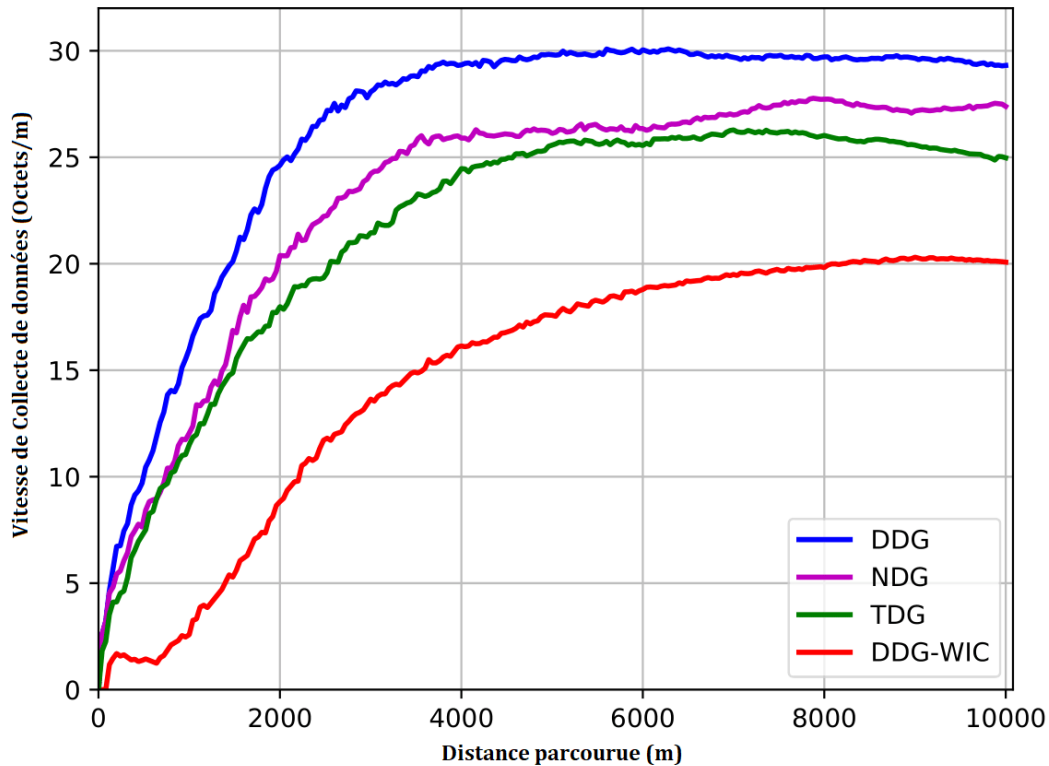


FIGURE 5.6 – Vitesse de collecte de données

capteurs au sol lors de son déplacement pour atteindre la destination.

5.5.2 Résultats

Dans notre première évaluation des performances, nous nous sommes concentrés sur la comparaison de toutes les stratégies en termes de vitesse de collecte de données. Dans ce cas, nous avons déployé un ensemble de nœuds capteurs à 75 sur une zone de 2 000 m par 2 000 m. Nous considérons que le drone est initialement déployé à la position (0,0) et à une altitude de 20 m. La Fig 5.6 représente la vitesse de collecte de données obtenue lorsque le drone utilise les stratégies DDG, NDG, TDG et DDG-WIC. La vitesse de collecte de données est calculée comme la quantité de données en octets collectées par le drone par distance parcourue en mètres.

Dans la figure 5.6, la vitesse de collecte de données lors de l'utilisation de la stratégie DDG surpasse la vitesse de collecte de données de toutes les autres stratégies. Par

exemple, à une distance de déplacement de 2000 m , la vitesse de collecte du drone lors de l'utilisation du DDG est presque égale à 25 *octet/m*, alors qu'elle n'est que d'environ 20 *octet/m* pour NDG et TDG et tombe à moins plus de 10 *octet/m* pour le DDG-WIC. Nous remarquons également que NDG et TDG donnent des résultats similaires lorsque la distance parcourue est inférieure à 8000 m . Cependant, à partir de cette distance, la stratégie NDG surpasse TDG.

Nous pouvons également remarquer que lorsque plus de distance parcourue par le drone est réalisée, l'écart entre les vitesses de collecte de DDG et NDG est réduit. Cette tendance pourrait s'expliquer par le fait que le paramètre α est mis à jour au fur et à mesure que la distance parcourue par le drone augmente. En effet, dans les premières étapes, le drone privilégie les nœuds ayant le plus de données dans leur buffer même si ces nœuds sont à grande distance. Le drone est autorisé à effectuer des trajets plus longs si, en retour, il collecte plus de données. De cette courbe, on peut conclure que le DDG améliore les performances du drone en termes de quantité de données collectées par distance parcourue.

Dans la figure 5.7, nous considérons la même configuration que précédemment et nous traçons le pourcentage de données collectées pour les quatre stratégies. Comme prévu, la stratégie DDG surpasse toutes les autres stratégies. On peut également observer que NDG et TDG donnent des performances similaires sauf lorsque le drone commence à parcourir des distances importantes.

On peut également remarquer que permettre au drone de collecter des données à partir de nœuds capteurs intermédiaires conduit à collecter une quantité de données plus importante. Par exemple, dans DDG, après une distance de 10000 m , la quantité de données collectées par le drone est presque égale à 80% de toutes les données présentes dans le réseau. Dans le même temps, ce montant est légèrement inférieur à 60% pour le DDG-WIC. En effet, dans la stratégie DDG-WIC, le drone ne peut pas collecter de données à partir de nœuds de capteurs intermédiaires le long de son chemin. Comme présenté précédemment, cela peut correspondre à des situations où le drone ne peut pas se déplacer directement vers une destination spécifique. Dans ce cas, pour atteindre le prochain nœud de capteur, le drone doit gagner de l'altitude pour éviter tout obstacle, comme dans une forêt. Par conséquent, il peut perdre la connexion avec les capteurs au sol. En conclusion, il est plus intéressant de permettre au drone de collecter des données à partir de nœuds intermédiaires lorsque cela est possible, même si la quantité de données au sein de ce nœud est insuffisante pour attirer le drone.

Dans la fig. 5.8, nous décrivons le pourcentage de données collectées lorsque nous

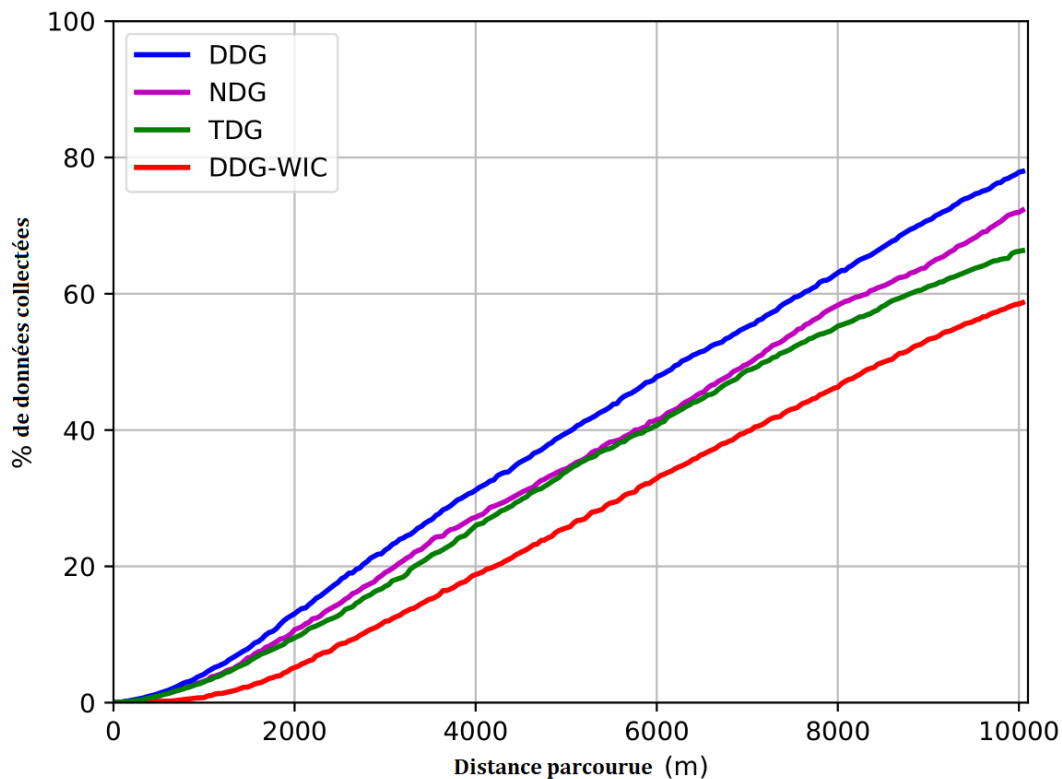


FIGURE 5.7 – Quantité de données récoltées par distance parcourue

avons fait varier le nombre de nœuds de capteurs dans la zone. Comme on peut le voir, la stratégie DDG offre de meilleures performances que les autres méthodes. Par exemple, lorsque nous avons déployé 50 nœuds de capteurs, le drone peut collecter près de 72 % de la quantité totale de données présentes sur le réseau, tandis que NDG, TDG et DDG-WIC collectent 65 %, 62 % et 60 % respectivement. La même tendance est observée lorsque nous définissons le nombre de nœuds de capteurs à 100. Il est intéressant de remarquer que lorsque le nombre de nœuds de capteurs déployés est augmenté, un pourcentage plus élevé de données peut être collecté. Cela est principalement dû au fait qu'une plus grande densité offre plus d'opportunités au drone de survoler plusieurs capteurs et de collecter plus de données simultanément.

Fig. 5.9 représente le pourcentage de données collectées obsolètes pour un nombre différent de nœuds de capteurs déployés. La période de validité des données est définie de manière aléatoire entre 500 et 700 au sein de chaque nœud de capteur. Comme nous pouvons le voir, la stratégie TMD surpasse toutes les autres approches. En effet, lors

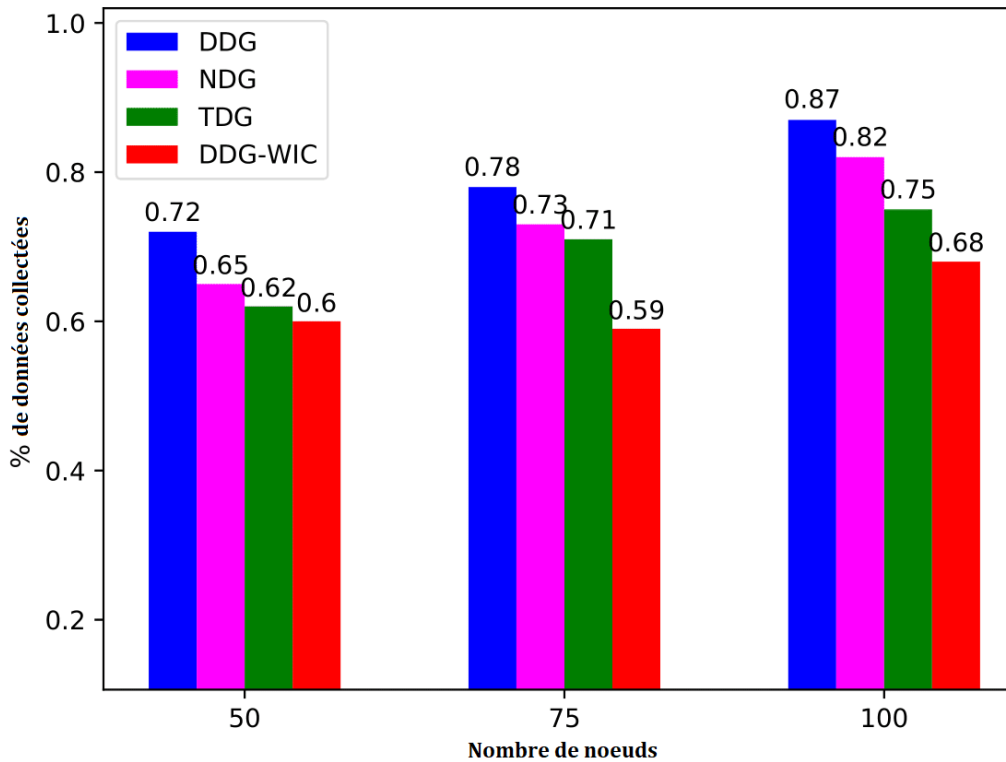


FIGURE 5.8 – Quantité de données récoltée VS nombre de noeuds capteurs

de l'attribution des scores d'attractivité à chaque nœud, le drone accorde une grande importance à l'âge des données. Cela signifie que les nœuds avec les données les plus anciennes stockées dans leurs tampons reçoivent une priorité plus élevée et sont donc visités en premier.

La Fig. 5.10 montre la quantité de données collectées valides en fonction des fréquences de détection des données. Sur cette figure, nous avons fait varier la fréquence de détection des nœuds capteurs afin d'étudier l'impact de ce paramètre sur la quantité de données valides collectées à l'aide des méthodes TDG et DDG. Comme nous pouvons le voir, la méthode TDG surpasse la méthode DDG pour les différentes plages de valeurs. Par exemple, pour des fréquences de capture de données allant de 15 octets/s , la méthode TDG collecte près de 98% de données avant qu'elles n'expirent. Alors que pour la méthode DDG, cette quantité tombe à 61 %. De même, pour les autres plages de fréquences de capture, la quantité de données collectées à l'aide du TDG est bien supérieure à celle du DDG.

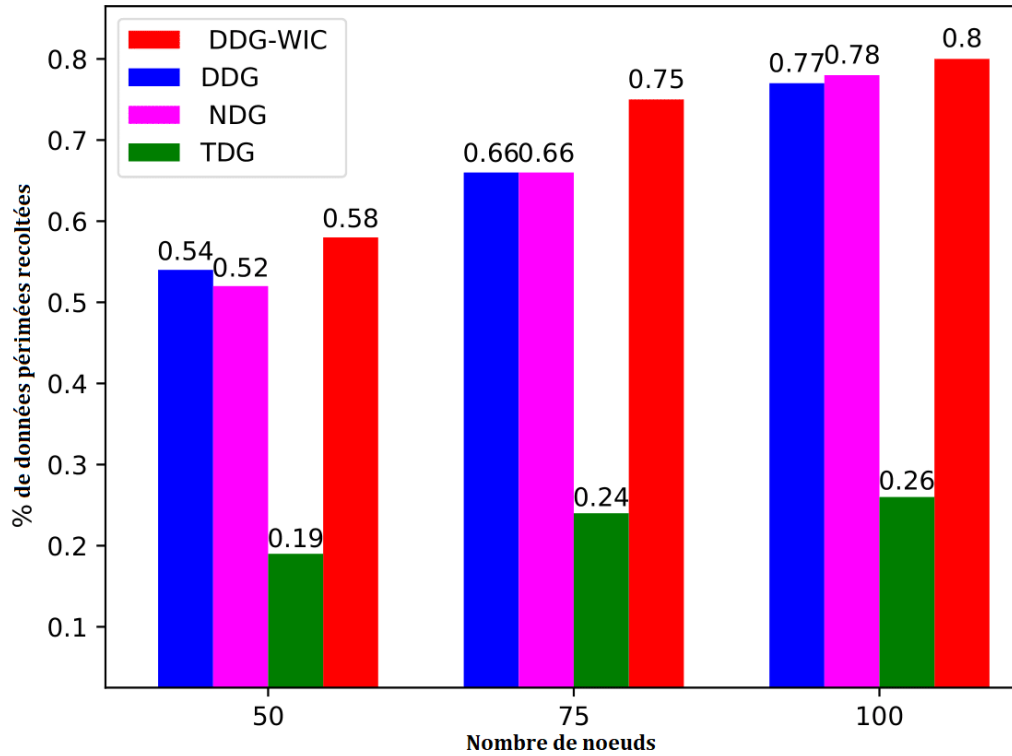


FIGURE 5.9 – Quantité de données Valides collectées VS nombre de noeuds capteurs

Enfin, il est essentiel d'évaluer les approches proposées en termes d'énergie consommée. En effet, l'un des objectifs premiers de l'utilisation d'un drone est d'allonger la durée de vie du réseau. En plus des stratégies mentionnées ci-dessus, nous avons également mesuré l'énergie consommée par le réseau en considérant une stratégie classique de routage de données entre les nœuds capteurs et un puits que nous plaçons aux coordonnées initiales du drone. Nous choisissons OLSR comme protocole de routage de données. Comme nous pouvons le voir sur la figure 5.11, les nœuds capteurs consomment beaucoup plus d'énergie lorsque la stratégie de collecte de données est basée sur OLSR. Par exemple, à $t = 1000s$, la puissance moyenne consommée par les nœuds capteurs est légèrement supérieure à $1 j$. En revanche, lorsque nous utilisons l'une de nos stratégies basées sur les drones (DDG ou TDG), la consommation d'énergie est inférieure à $0,4 j$, ce qui conduit à une amélioration de plus de 60%. Cette amélioration est due au fait que les nœuds capteurs ne sont plus obligés de transmettre périodiquement leurs données à un point central en utilisant un protocole de communication multi-sauts, ce

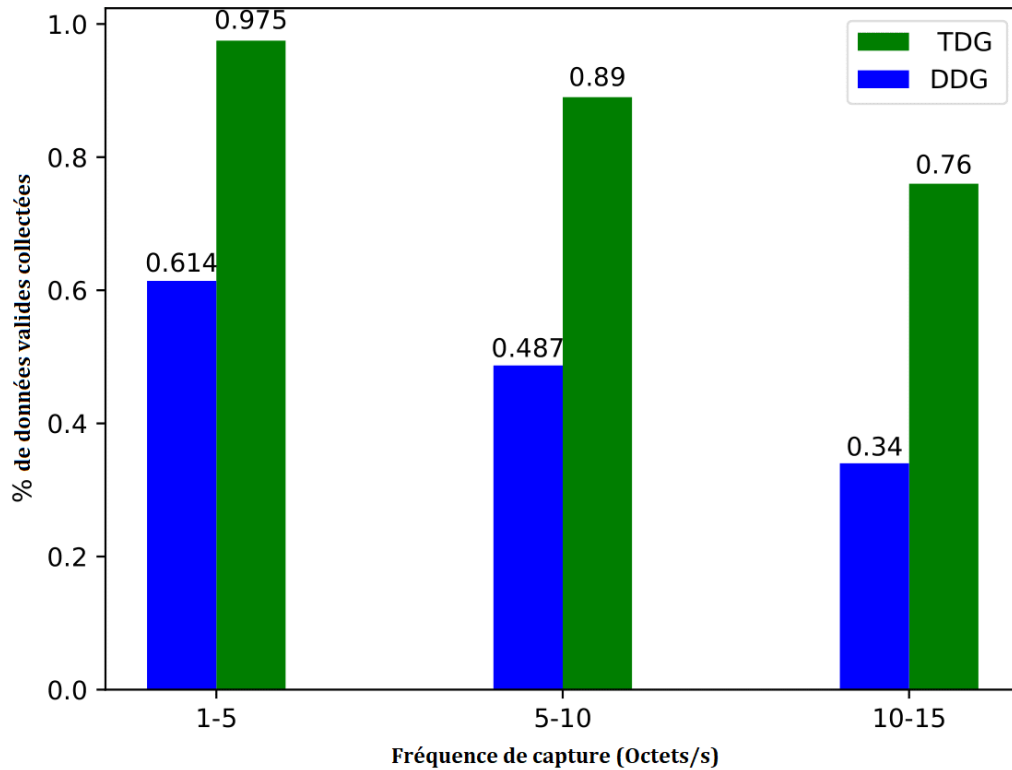


FIGURE 5.10 – Quantité de données valides collectée VS fréquences de capture

qui conduit à une consommation d'énergie élevée. En revanche, en DDG et TDG, les nœuds capteurs ne transmettent leurs données qu'après détection du drone.

5.6 Conclusion

Cet travail a présenté deux stratégies dynamiques pour la collecte de données à partir d'un réseau de capteurs sans fil au sol. Par rapport à des études antérieures visant à réduire la trajectoire du puits mobile ou encore à éviter les obstacles, nous proposons de nous concentrer sur la quantité de données collectées et leur validité. La première stratégie, nommée Data-driven Gathering Strategy – DDG, vise à collecter le maximum de données stockées par les capteurs. Nous avons proposé une fonction de coût qui attribue un score à chaque nœud de capteur en fonction de la quantité de données que chaque tampon de nœud de capteur transporte et de la distance séparant

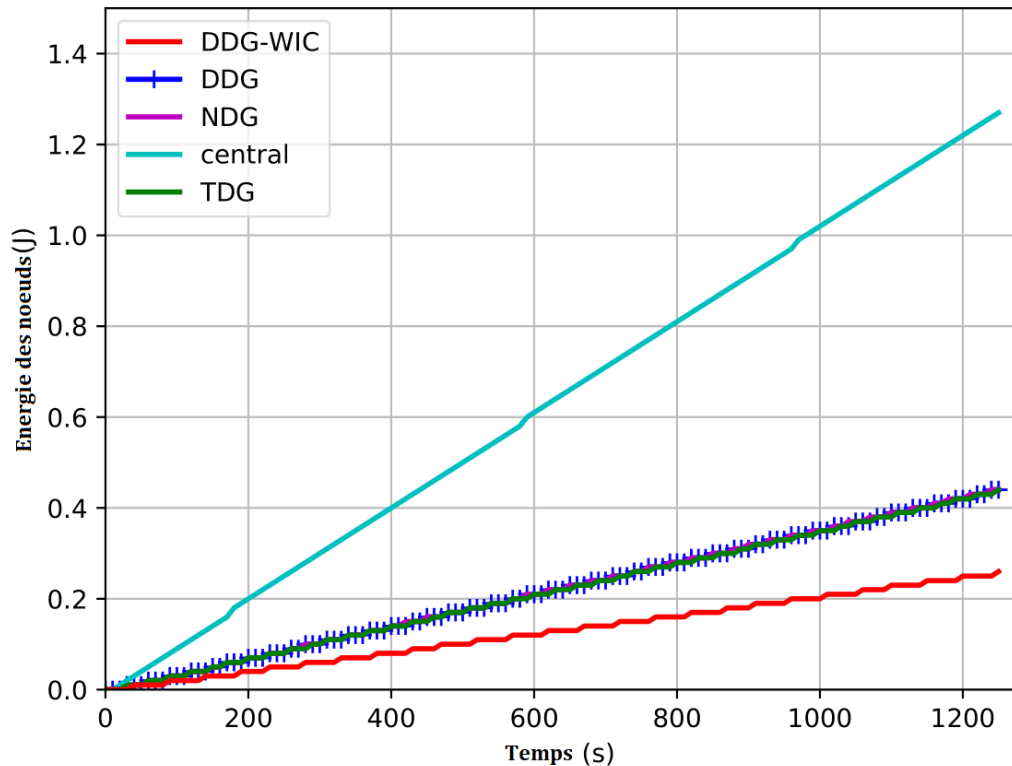


FIGURE 5.11 – Consommation d’énergie des noeuds capteurs

ce nœud du drone. Nous avons également proposé une seconde stratégie, nommée Time Driven Data Gathering Strategy – TDG, qui vise à collecter un maximum de données avant une échéance donnée. Nous avons également défini une fonction de coût basée sur deux paramètres à savoir l’âge des données et la distance séparant le nœud capteur et le drone.

Pour évaluer les performances de nos deux approches, nous avons implémenté à la fois DDG et TDG sur le simulateur OMNeT++. Nous avons comparé nos résultats à d’autres approches existantes. Les résultats obtenus montrent que DDG permet au drone de suivre un chemin de collecte qui maximise la quantité de données collectées quelle que soit leur échéance. D’autre part, la stratégie TMD maximise la quantité de données recueillies tout en respectant leurs échéances.

Dans nos futurs travaux, nous prévoyons d’étendre cette étude en considérant les informations au voisinage de chaque nœud afin d’améliorer les performances de nos approches. L’utilisation de plusieurs drones vaut également la peine d’être explorée.

Chapitre 6

Conclusion

Ce chapitre conclut la thèse par un résumé de ses contributions et un aperçu des orientations futures de la recherche.

6.1 Synthèse

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) sont au centre d'une révolution résultant de l'avancement des technologies, de la miniaturisation des capteurs et de leurs capacités à détecter différentes grandeurs. Les WSN sont largement utilisés dans de nombreuses applications qui ont comme objectif principal la collecte de données à partir d'un grand nombre de nœuds capteurs souvent alimentés par batterie, à faible capacité de calcul, à mémoire réduite et déployés de manière aléatoire dans la zone d'intérêt. La collecte de données doit être réalisée en s'assurant d'une utilisation efficace des ressources WSN.

En effet, du fait des limitations physiques des nœuds capteurs et des changements imprévisibles et fréquents des environnements WSN, les données brutes générées sont sensibles à la présence de diverses anomalies. De plus, l'envoi de toutes les données captées vers le nœud collecteur (le nœud sink) peut être une opération coûteuse en termes de consommation de ressources WSN. Ces limitations introduisent de nouveaux défis dont l'approvisionnement énergétique limité des capteurs. Il est important de trouver une solution adéquate qui améliore la durée de vie de WSN et qui permet une collecte efficace des données. Les nœuds de capteurs sont généralement déployés dans des environnements hostiles qui rendent la recharge ou le remplacement des batteries épuisées une tâche difficile. Par conséquent, l'optimisation des ressources des capteurs lors de la collecte des données est d'une importance capitale dans les WSN.

L'un des problèmes le plus récurrent dans ces réseaux dits stationnaires est le problème du goulot d'étranglement. En effet, les noeuds se trouvant à proximité du noeud sink viennent à épuiser leurs réserves énergétiques plus rapidement que les autres noeuds plus éloignés du sink car ils prennent en charge la retransmission des paquets des autres noeuds du réseau. L'une des solutions proposées est l'utilisation d'un noeud sink mobile. L'utilisation d'un collecteur de données mobile s'est présentée comme l'une des solutions possibles à ce problème pour aider à prolonger la durée de vie du réseau.

Les collecteurs mobiles traditionnels se déplacent généralement au sol avec des vitesses et des conditions de mouvement limitées. Il est difficile d'utiliser les noeuds mobiles traditionnels dans les zones difficiles (telles que la montagne enneigée, la forêt sauvage, etc.). Les UAV deviennent un meilleur choix pour de telles applications en raison de ses conditions étendues et flexibles. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux effectués dans cette thèse.

6.2 Apports de la thèse

Dans la première partie de cette thèse, nous avons présenté des généralités sur les réseaux de capteurs sans fils, les difficultés de la collecte de données dans ces réseaux et les différentes solutions proposées dans la littérature. Nous avons aussi présenté un état de l'art sur les différents schémas de planification de trajectoire des UAV lors de leur utilisation comme noeud sink mobile.

Dans une seconde partie de la thèse, nous avons fait la proposition d'un modèle de collecte des données d'un réseau de capteurs en utilisant un drone. En raison du grand nombre de capteurs qui composent le réseau, nous avons proposé d'élire un sous-ensemble de noeuds qui doivent agir en tant que têtes de cluster, car le drone n'a pas la possibilité de survoler chacun des noeuds capteurs afin d'en récolter les informations captées. Le drone collecte donc les données uniquement de ces têtes de cluster. Toute la problématique est de sectionner le bon nombre de capteurs ainsi que leurs positions afin de collecter l'ensemble des données tout en minimisant la quantité d'énergie consommée à la fois par les capteurs et par le drone. Cependant, cette solution ne peut être appliquée qu'en offline et nécessite une connaissance complète de l'état des capteurs en termes d'énergie disponible et de données à transmettre. Elle ne permet pas non plus une solution à très large échelle.

Afin de permettre un passage à l'échelle, nous avons proposé une seconde approche

basée sur les forces virtuelles. L'idée de base est de qu'un capteur est une source de force attractive qui attire le drone. Nous avons donc divisé le réseau en plusieurs zones contenant un ou plusieurs noeuds capteurs. Le drone devra alors se déplacer vers la partie du réseau qui émet le signal le plus fort (c'est-à-dire la zone contenant les noeuds ayant la plus grande quantité de données). Comme précédemment, l'objectif de notre travail est de collecter le maximum de données tout en limitant la consommation d'énergie du drone. Ce travail a également fait l'objet d'une publication dans une conférence internationale IEEE.

Dans la dernière partie de la thèse nous avons élaboré une solution en ligne. L'idée est de permettre à un drone de découvrir la distribution des données dans le réseau et d'adapter son chemin en fonction de la localisation de ces données, de l'importance des données, mais également de son temps de vol. Pour cela, nous avons dans un premier temps étendu le protocole de routage OLSR entre les capteurs afin de profiter de sa signalisation et de permettre aux capteurs de diffuser la quantité de données disponible ainsi que leurs durées de vie (deadline). Par la suite, nous avons également proposé plusieurs fonctions de priorités afin de sélectionner le prochain capteur visité. L'objectif était de collecter le maximum de données en un minimum de temps.

6.3 Perspectives

Les approches présentées dans ce manuscrit ont montré de très bonnes performances. Néanmoins, nous pouvons penser à de nombreuses perspectives. Tout d'abord, nous envisageons de tester la faisabilité des solutions proposées dans un environnement réel. Nous avons validé toutes nos propositions par des simulations. Le comportement de nos algorithmes et de nos approches sur des plateformes réelles incluant des obstacles statiques ou mobiles et par expérimentations serait un facteur décisif dans l'évaluation de ces solutions.

Un second objectif serait d'envisager d'utiliser nos solutions en considérant un flotte de drones afin de répartir la charge de récolte sur plusieurs drones et d'améliorer les performances de nos approches en terme de quantité de données récoltées et de temps de collecte.

Liste des publications :

- C. Y. Tazibt, M. Bekhti, T. Djamah, N. Achir and K. Boussetta, "Wireless sensor network clustering for UAV-based data gathering," 2017 Wireless Days, 2017, pp. 245-247, doi : 10.1109/WD.2017.7918154.
- C. Y. Tazibt, N. Achir, P. Muhlethaler and T. Djamah, "UAV-Based Data Gathering Using An Artificial Potential Fields Approach," 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTCFall), 2018, pp. 1-5, doi : 10.1109/VTC-Fall.2018.8691007.
- C. Y. Tazibt, N. Achir and T. Djamah, "Online Drone-based Data Gathering Strategies for Ground Sensor Networks", In International Journal of Sensor Networks 2021.

Bibliographie

- [1] <https://www.elprocus.com/introduction-to-wireless-sensor-networks-types-and-applications/>, Last accessed on 2018-11-30.
- [2] <https://www.semanticscholar.org/paper/Multipoint-Relay-flooding-3A-Network-coding-Zhu/c5c643eeb2edce6ffb0f507d2dbc05b4c1e1e2f5/>, Last accessed on 2019-06-17.
- [3] <https://www.dji.com/phantom-3-standard/info>.
- [4] Nicolas Achotte. *Conception, optimisation et dimensionnement d'un micromoteur planaires à aimants permanent pour drones miniatures en vol stationnaire*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2005.
- [5] Djibrilla Incha Adamou. *Réseaux de collecte de données pour les zones blanches étendues*. PhD thesis, Paris Saclay, 2019.
- [6] Djibrilla Incha Adamou, Alexandre Mouradian, and Véronique Vèque. Towards the use of commercial flights for data collection in wide white area networks. In *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 241–248. IEEE, 2019.
- [7] S.M. Adams and C.J. Friedland. *A Survey of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Usage for Imagery Collection in Disaster Research and Management*. publisher not identified.
- [8] Mohammad Hossein Adhami, Reza Ghazizade, and Mohammad-Hassan Majidi. Dual-mode multiple-target tracking in wireless sensor networks based on sensor grouping and maximum likelihood estimation. *International Journal of Communication Systems*, 33(8) :e4352, 2020.
- [9] Ian F Akyildiz and Erich P Stuntebeck. Wireless underground sensor networks : Research challenges. *Ad Hoc Networks*, 4(6) :669–686, 2006.

- [10] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, 40(8) :102–114, 2002.
- [11] David Alejo, Jose A Cobano, Guillermo Heredia, J Ramiro Martínez-de Dios, and Anibal Ollero. Efficient trajectory planning for wsn data collection with multiple uavs. In *Cooperative Robots and Sensor Networks 2015*, pages 53–75. Springer, 2015.
- [12] Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Mario Di Francesco, and Manuel Roveri. Energy management in wireless sensor networks with energy-hungry sensors. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 12(2) :16–23, 2009.
- [13] Karen Anderson and Kevin J Gaston. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3) :138–146, 2013.
- [14] Reza Arezoumand and Syamsiah Mashohor. Deploying clustered wireless sensor network by multi-robot system. In *2014 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSC 2014)*, pages 107–111. IEEE, 2014.
- [15] Alfonso Ariza and Vincenzo Inzillo. Inetmanet framework. In *Recent Advances in Network Simulation*, pages 107–138. Springer, 2019.
- [16] Chris Baker. *A combined mechanism for UAV explorative path planning, task allocation and predictive placement*. PhD thesis, University of Southampton, 2016.
- [17] Muhammed Enes Bayrakdar. A smart insect pest detection technique with qualified underground wireless sensor nodes for precision agriculture. *IEEE Sensors Journal*, 19(22) :10892–10897, 2019.
- [18] Tatiana Bokareva, Wen Hu, Salil Kanhere, Branko Ristic, Neil Gordon, Travis Bessell, Mark Rutten, and Sanjay Jha. Wireless sensor networks for battlefield surveillance. In *Proceedings of the land warfare conference*, pages 1–8, 2006.
- [19] Omar Bouhamed, Hakim Ghazzai, Hichem Besbes, and Yehia Massoud. A uav-assisted data collection for wireless sensor networks : Autonomous navigation and scheduling. *IEEE Access*, 8 :110446–110460, 2020.
- [20] Nedo Celandroni, Erina Ferro, Alberto Gotta, Gabriele Oligeri, Cesare Roseti, Michele Luglio, Igor Bisio, Marco Cello, Franco Davoli, Athanasios D Panagopoulos, et al. A survey of architectures and scenarios in satellite-based wireless

- sensor networks : system design aspects. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 31(1) :1–38, 2013.
- [21] Kai Chang, Yuanqing Xia, Kaoli Huang, and Dailiang Ma. Moving target tracking of a uav formation. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2016 Chinese*, pages 2542–2547. IEEE, 2016.
- [22] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikolettseas. Efficient data propagation strategies in wireless sensor networks using a single mobile sink. *Computer Communications*, 31(5) :896–914, 2008.
- [23] Vrajesh Kumar Chawra and Govind P Gupta. Multiple uav path-planning for data collection in cluster-based wireless sensor network. In *2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*, pages 194–198. IEEE, 2020.
- [24] Fairouz Chehbour, Zouina Doukha, Samira Moussaoui, and Mohamed Guerroumi. Oms : Opportunistic mules for short latency data collection in smart cities. *International Journal of Communication Systems*, page e4207, 2019.
- [25] Yong-bo Chen, Guan-chen Luo, Yue-song Mei, Jian-qiao Yu, and Xiao-long Su. Uav path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory. *International Journal of Systems Science*, 47(6) :1407–1420, 2016.
- [26] T Clausen and P Jacquet. Rfc 3626 : Optimized link state routing protocol (olsr), oct 2003. *Google Scholar Google Scholar Digital Library Digital Library*.
- [27] Thomas Clausen and Philippe Jacquet. Rfc3626 : Optimized link state routing protocol (olsr), 2003.
- [28] Calvin Coopmans and Yiding Han. Aggieair : An integrated and effective small multi-uav command, control and data collection architecture. In *ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages 641–647. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [29] Edison Pignaton De Freitas, Tales Heimfarth, Ivayr Farah Netto, Carlos Eduardo Lino, Carlos Eduardo Pereira, Armando Morado Ferreira, Flávio Rech Wagner, and Tony Larsson. Uav relay network to support wsn connectivity. In *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*, pages 309–314. IEEE, 2010.

- [30] Luciana Moreira Sá De Souza, Harald Vogt, and Michael Beigl. A survey on fault tolerance in wireless sensor networks.
- [31] Yasmine DERDOUR. *Conception et Développement d'un Système d'exploitation basé sur les Réseaux de Capteurs sans fil*. PhD thesis, Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella.
- [32] Nathalie Dessart, Hacene Fouchal, Philippe Hunel, Harry Gros-Desormeaux, and Nicolas Vidot. Distributed decision for medical alerts using wireless sensors. In *2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multi-media Networks & Workshops*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [33] Mario Di Francesco, Sajal K Das, and Giuseppe Anastasi. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements : A survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 8(1) :7, 2011.
- [34] Ibrahima Diane. *Optimisation de la consommation d'énergie par la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2014.
- [35] Arnolito Díaz-Ramírez, Luis A Tafoya, Jorge A Atempa, and Pedro Mejía-Alvarez. Wireless sensor networks and fusion information methods for forest fire detection. *Procedia Technology*, 3 :69–79, 2012.
- [36] Stephen R Dixon, Christopher D Wickens, and Dervon Chang. Comparing quantitative model predictions to experimental data in multiple-uav flight control. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 47, pages 104–108. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2003.
- [37] Goran M Djuknic and Robert E Richton. Geolocation and assisted gps. *Computer*, 34(2) :123–125, 2001.
- [38] Nourhene Ellouze, Slim Rekhis, and Noureddine Boudriga. A wsn-based solution for pollution detection and localization in waterways. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(4) :3213–3233, 2019.
- [39] Khadidja Fellah and Bouabdellah Kechar. New approach based on hilbert curve for energy efficient data collection in wsn with mobile sink. *IET Wireless Sensor Systems*, 2020.
- [40] Kyle F. Flynn and Steven C. Chapra. Remote sensing of submerged aquatic vegetation in a shallow non-turbid river using an unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing*, 6(12) :12815, 2014.

- [41] Tia Gao, Dan Greenspan, Matt Welsh, Radford R Juang, and Alex Alm. Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network. In *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, pages 102–105. IEEE, 2006.
- [42] Antonio-Javier Garcia-Sanchez, Felipe Garcia-Sanchez, and Joan Garcia-Haro. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops. *Computers and electronics in agriculture*, 75(2) :288–303, 2011.
- [43] Guoyou He. Destination-sequenced distance vector (dsv) protocol. *Networking Laboratory, Helsinki University of Technology*, pages 1–9, 2002.
- [44] Vendula Hejlova and Vit Vozenilek. Wireless sensor network components for air pollution in urban environment : Criteria and analysis for their selection. *Wireless Sensor Networks*, pages 229–240.
- [45] Hailong Huang and Andrey V Savkin. An energy efficient approach for data collection in wireless sensor networks using public transportation vehicles. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 75 :108–118, 2017.
- [46] Huiping Huang, Shide Xiao, Xiangyin Meng, and Ying Xiong. A remote home security system based on wireless sensor network and gsm technology. In *2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, volume 1, pages 535–538. IEEE, 2010.
- [47] Texas Instruments. 2.4 ghz ieee 802.15. 4/zigbee-ready rf transceiver.–2007. *Received*, 2 :20, 2009.
- [48] Anik Islam and Soo Young Shin. Bhmus : blockchain based secure outdoor health monitoring scheme using uav in smart city. In *2019 7th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [49] Haider Mahmood Jawad, Rosdiadee Nordin, Sadik Kamel Gharghan, Aqeel Mahmood Jawad, and Mahamod Ismail. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture : A review. *Sensors*, 17(8) :1781, 2017.
- [50] Xiaoting Ji, Xiangke Wang, Yifeng Niu, and Lincheng Shen. Cooperative search by multiple unmanned aerial vehicles in a nonconvex environment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015.

- [51] Philo Juang, Hidekazu Oki, Yong Wang, Margaret Martonosi, Li Shiuan Peh, and Daniel Rubenstein. Energy-efficient computing for wildlife tracking : Design tradeoffs and early experiences with zebranet. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 30(5) :96–107, 2002.
- [52] Rahim Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, 2009.
- [53] Evizal Abdul Kadir, Hitoshi Irie, and Sri Listia Rosa. River water pollution monitoring using multiple sensor system of wsns (case : Siak river, indonesia). In *2019 6th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, pages 75–79. IEEE, 2019.
- [54] VS Kallur and SN Kulkarni. Power management, monitoring and controlling in intelligent buildings using wireless sensor network (wsn). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(07) :1350–1355, 2016.
- [55] Anita Kanavalli, Dennis Sserubiri, P Deepa Shenoy, KR Venugopal, and LM Patnaik. A flat routing protocol for sensor networks. In *2009 Proceeding of International Conference on Methods and Models in Computer Science (ICM2CS)*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [56] Soujanya Katikala. Google project loon. *InSight : Rivier Academic Journal*, 10(2) :1–6, 2014.
- [57] Zakia Khalfallah, Ilhem Fajjari, Nadjib Aitsaadi, Paul Rubin, and Guy Pujolle. A novel 3d underwater wsn deployment strategy for full-coverage and connectivity in rivers. In *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–7. IEEE, 2016.
- [58] Majid I Khan, Wilfried N Gansterer, and Guenter Haring. Static vs. mobile sink : The influence of basic parameters on energy efficiency in wireless sensor networks. *Computer communications*, 36(9) :965–978, 2013.
- [59] Oussama Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The international journal of robotics research*, 5(1) :90–98, 1986.
- [60] Taufik Khuswendi, Hilwadi Hindersah, and Widyardana Adiprawita. Uav path planning using potential field and modified receding horizon a* 3d algorithm. In *Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2011 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2011.

- [61] Athanasios Kinalis, Sotiris Nikolettseas, Dimitra Patroumpa, and Jose Rolim. Biased sink mobility with adaptive stop times for low latency data collection in sensor networks. *Information fusion*, 15 :56–63, 2014.
- [62] C Sahaya Kingsly, J George, and Chellin Chandran. Critical study on constraints in wireless sensor network applications. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(7) :1311–1316, 2013.
- [63] Baichuan Kong, Hejiao Huang, and Xiaohua Jia. Path planning for sensor data collection by using uavs. In *2018 14th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)*, pages 199–205. IEEE, 2018.
- [64] Mohammed Lamine Laouira, Abdelkrim Abdelli, Jalel Ben Othman, and Hyunbum Kim. An efficient wsn based solution for border surveillance. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2019.
- [65] Rana M Amir Latif, Laiqa-Binte Imran, Muhammad Farhan, Mohamed Jaward Bah, Ghazanfar Ali, and Yawar Abbas Abid. Real-time simulation of iot based smart home live mirror using wsn. In *2019 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*, pages 49–495. IEEE, 2019.
- [66] Euisin Lee, Soochang Park, Jeongcheol Lee, Seungmin Oh, and Sang-Ha Kim. Novel service protocol for supporting remote and mobile users in wireless sensor networks with multiple static sinks. *Wireless Networks*, 17(4) :861–875, 2011.
- [67] Mo Li and Yunhao Liu. Underground structure monitoring with wireless sensor networks. In *2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pages 69–78. IEEE, 2007.
- [68] Yan-Xiao Li, Hua Guan, and Yue-Ling Zhang. Energy efficient and reliable target monitoring in the tactical battlefield. In *International Conference on Electronic Commerce, Web Application, and Communication*, pages 115–121. Springer, 2011.
- [69] Stephanie Lindsey and Cauligi S Raghavendra. Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Proceedings, IEEE aerospace conference*, volume 3, pages 3–3. IEEE, 2002.
- [70] Juan Liu, Xijun Wang, Bo Bai, and Huaiyu Dai. Age-optimal trajectory planning for uav-assisted data collection. In *IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 553–558. IEEE, 2018.

- [71] Yanping Liu and Kamal K Bharadwaj. A hybrid artificial potential field : genetic algorithm approach to mobile robot path planning in dynamic environments. In *Computer Science and Convergence*, pages 325–333. Springer, 2012.
- [72] Yuecheng Liu and Yongjia Zhao. A virtual-waypoint based artificial potential field method for uav path planning. In *Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2016 IEEE Chinese*, pages 949–953. IEEE, 2016.
- [73] Chuanwen Luo, Wenping Chen, Deying Li, Yongcai Wang, Hongwei Du, Lidong Wu, and Weili Wu. Optimizing flight trajectory of uav for efficient data collection in wireless sensor networks. *Theoretical Computer Science*, 853 :25–42, 2021.
- [74] Xiaoyan Ma. *Data collection of mobile sensor networks by drones*. PhD thesis, 2017.
- [75] Xiaoyan Ma, Rahim Kacimi, and Riadh Dhaou. Fairness-Aware UAV-Assisted Data Collection in Mobile Wireless Sensor Networks. In *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Paphos, Cyprus, 05/09/2016-09/09/2016*. IEEE, 2016.
- [76] Praveen Kumar Reddy Maddikunta, Saqib Hakak, Mamoun Alazab, Sweta Bhattacharya, Thippa Reddy Gadekallu, Wazir Zada Khan, and Quoc-Viet Pham. Unmanned aerial vehicles in smart agriculture : Applications, requirements and challenges. *arXiv preprint arXiv :2007.12874*, 2020.
- [77] SV Manisekaran and R Venkatesan. Energy efficient hierarchical clustering for sensor networks. In *2010 Second International conference on Computing, Communication and Networking Technologies*, pages 1–11. IEEE, 2010.
- [78] Arati Manjeshwar and Dharma P Agrawal. Teen : A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *ipdps*, volume 1, page 189, 2001.
- [79] Prateek Mathur, Rasmus H Nielsen, Neeli R Prasad, and Ramjee Prasad. Data collection using miniature aerial vehicles in wireless sensor networks. *IET Wireless Sensor Systems*, 6(1) :17–25, 2016.
- [80] Andriy Mazayev, Noélia Correia, and Gabriela Schütz. Data gathering in wireless sensor networks using unmanned aerial vehicles. *International Journal of Wireless Information Networks*, 23(4) :297–309, 2016.
- [81] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT express*, 5(1) :1–7, 2019.

- [82] C. E. Miller, A. W. Tucker, and R. A. Zemlin. Integer programming formulation of traveling salesman problems. *J. ACM*, 7(4) :326–329, October 1960.
- [83] Selli Mohapatra and Priyadarshi Kanungo. Performance analysis of aodv, dsr, olsr and dsdv routing protocols using ns2 simulator. *Procedia Engineering*, 30 :69–76, 2012.
- [84] Ho Jeong Na and Sang-Jo Yoo. Pso-based dynamic uav positioning algorithm for sensing information acquisition in wireless sensor networks. *IEEE Access*, 7 :77499–77513, 2019.
- [85] Kashif Nisar, Ag Asri Ag Ibrahim, Lifan Wu, Abzetdin Adamov, and M Jamal Deen. Smart home for elderly living using wireless sensor networks and an android application. In *2016 IEEE 10th international conference on application of information and communication technologies (AICT)*, pages 1–8. IEEE, 2016.
- [86] Pham Cong-Duc Thiare Ousmane et al. *Optimisation de la transmission d’images dans les réseaux de capteurs pour des applications critiques de surveillance*. PhD thesis, Pau, 2014.
- [87] Fatma Outay, Hanan Abdullah Mengash, and Muhammad Adnan. Applications of unmanned aerial vehicle (uav) in road safety, traffic and highway infrastructure management : recent advances and challenges. *Transportation research part A : policy and practice*, 141 :116–129, 2020.
- [88] Celal Ozturk, Yanyong Zhang, and Wade Trappe. Source-location privacy in energy-constrained sensor network routing. In *Proceedings of the 2nd ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks*, pages 88–93, 2004.
- [89] Jaime Paneque-Gálvez, Michael K McCall, Brian M Napoletano, Serge A Wich, and Lian Pin Koh. Small drones for community-based forest monitoring : An assessment of their feasibility and potential in tropical areas. *Forests*, 5(6) :1481–1507, 2014.
- [90] J Rejina Parvin and C Vasanthanayaki. Particle swarm optimization-based energy efficient target tracking in wireless sensor network. *Measurement*, 147 :106882, 2019.
- [91] Guilherme AS Pereira, Marcelo Borghetti Soares, and Mario Fernando Montenegro Campos. A potential field approach for collecting data from sensor networks using mobile robots. In *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Pro-*

- ceedings. *2004 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 4, pages 3469–3474. IEEE.
- [92] Patrick Jason Y Piera and Joseph Karl G Salva. A wireless sensor network for fire detection and alarm system. In *2019 7th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- [93] Gregory J Pottie and William J Kaiser. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5) :51–58, 2000.
- [94] Marios I Poulakis, Stavroula Vassaki, and Athanasios D Panagopoulos. Satellite-based wireless sensor networks : Radio communication link design. In *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 2620–2624. IEEE, 2013.
- [95] Michael JD Powell. Radial basis function for multivariable interpolation : a review. In *IMA Conference on Algorithms for the Approximation of Functions and Data, 1985*. RMCS, 1985.
- [96] Bhaskar Prince and Shruti Gupta. Load balanced and energy efficient data collection scheme using data mule for wsns. In *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, pages 1651–1655. IEEE, 2016.
- [97] Indira Priyadarshinee, Kabita Sahoo, and Chandrakant Mallick. Flood prediction and prevention through wireless sensor networking (wsn) : A survey. *International Journal of Computer Applications*, 113(9), 2015.
- [98] R Raj Priyadarshini and N Sivakumar. Enhancing coverage and connectivity using energy prediction method in underwater acoustic wsn. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, pages 1–10, 2019.
- [99] Hector Reyes and Naima Kaabouch. Improving the reliability of unmanned aircraft system wireless communications through cognitive radio technology. 2013.
- [100] Ayman Dawood Salman, Osamah Ibrahim Khalaf, and Ghaida Muttashar Abdulsahib. An adaptive intelligent alarm system for wireless sensor network. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15(1) :142–147, 2019.
- [101] Ali Sayyed and Leandro Buss Becker. A survey on data collection in mobile wireless sensor networks (mwsns). In *Cooperative Robots and Sensor Networks 2015*, pages 257–278. Springer, 2015.

- [102] Sid Ahmed Hichem Sedjelmaci. *Mise En uvre de Mécanismes Ds Sécurité Basée Sur les Ids pour les Réseaux de Capteurs Sans Fil*. PhD thesis, 2012.
- [103] Séverine Sentilles. Architecture logicielle pour capteurs sans-fil en réseau. *Master report, University of Pau, Pau, France*, 2006.
- [104] Atif Sharif, Vidyasagar Potdar, and Elizabeth Chang. Wireless multimedia sensor network technology : A survey. In *2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pages 606–613. IEEE, 2009.
- [105] Xin Su, Inam Ullah, Xiaofeng Liu, and Dongmin Choi. A review of underwater localization techniques, algorithms, and challenges. *Journal of Sensors*, 2020, 2020.
- [106] Milica Pejanović Đurišić, Zhilbert Tafa, Goran Dimić, and Veljko Milutinović. A survey of military applications of wireless sensor networks. In *2012 Mediterranean conference on embedded computing (MECO)*, pages 196–199. IEEE, 2012.
- [107] João Valente, David Sanz, Antonio Barrientos, Jaime del Cerro, Ángela Ribeiro, and Claudio Rossi. An air-ground wireless sensor network for crop monitoring. *Sensors*, 11(6) :6088–6108, 2011.
- [108] PS Vamsee and Syed Umar. A review of energy conservation in wireless sensor networks. *International Journal of Science, Engineering and Computer Technology*, 3(10) :353, 2013.
- [109] András Varga. Discrete event simulation system. In *Proc. of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*, pages 1–7, 2001.
- [110] R Vijayashree and C Suresh Ghana Dhas. Energy efficient data collection with multiple mobile sink using artificial bee colony algorithm in large-scale wsn. *Automatika*, 60(5) :555–563, 2019.
- [111] Leandro A Villas, Daniel L Guidoni, and Jo Ueyama. 3d localization in wireless sensor networks using unmanned aerial vehicle. In *2013 IEEE 12th International Symposium on Network Computing and Applications*, pages 135–142. IEEE, 2013.
- [112] Sonia Waharte and Niki Trigoni. Supporting search and rescue operations with uavs. In *Emerging Security Technologies (EST), 2010 International Conference on*, pages 142–147. IEEE, 2010.
- [113] Chengliang Wang, Fei Ma, Junhui Yan, Debraj De, and Sajal K Das. Efficient aerial data collection with uav in large-scale wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(11) :286080, 2015.

- [114] Chengliang Wang, Fei Ma, Junhui Yan, Debraj De, and Sajal K. Das. Efficient aerial data collection with uav in large-scale wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015 :2 :2–2 :2, January 2016.
- [115] Lan Wang and Yang Xiao. A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 11(5) :723–740, 2006.
- [116] Quanhong Wang, Kenan Xu, Glen Takahara, and Hossam Hassanein. On lifetime-oriented device provisioning in heterogeneous wireless sensor networks : approaches and challenges. *Ieee Network*, 20(3) :26–33, 2006.
- [117] Richard Wang, Manuela Veloso, and Srinivasan Seshan. Active sensing data collection with autonomous mobile robots. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2583–2588. IEEE, 2016.
- [118] Naifeng Wen, Lingling Zhao, Xiaohong Su, and Peijun Ma. Uav online path planning algorithm in a low altitude dangerous environment. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2(2) :173–185, 2015.
- [119] Alexander C Woods and Hung M La. Dynamic target tracking and obstacle avoidance using a drone. In *International Symposium on Visual Computing*, pages 857–866. Springer, 2015.
- [120] Paul Pao-Yen Wu, Duncan Campbell, and Torsten Merz. On-board multi-objective mission planning for unmanned aerial vehicles. In *2009 IEEE Aerospace conference*, pages 1–10. IEEE, 2009.
- [121] Yu Xu, Lin Xiao, Dingcheng Yang, Laurie Cuthbert, and Yapeng Wang. Energy-efficient uav communication with multiple gts based on trajectory optimization. *Mobile Information Systems*, 2018, 2018.
- [122] Qin Yang and Sang-Jo Yoo. Optimal uav path planning : Sensing data acquisition over iot sensor networks using multi-objective bio-inspired algorithms. *IEEE Access*, 6 :13671–13684, 2018.
- [123] Chao Yin, Zhenyu Xiao, Xianbin Cao, Xing Xi, Peng Yang, and Dapeng Wu. Offline and online search : Uav multiobjective path planning under dynamic urban environment. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2) :546–558, 2017.
- [124] Xiang Ying, Ru Wang, Mei Yu, Ruiguo Yu, Wenkai Shi, and Jianrong Wang. Nonuniform node distribution using adaptive poisson disk for wireless sensor networks. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–7. IEEE, 2019.

- [125] Rathod Yogirajsinh, Mehul B Shah, and Parthesh Mankodi. Efficient data gathering in wireless sensor network using mobile sink. In *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, pages 1416–1420. IEEE, 2016.
- [126] Changsheng You and Rui Zhang. Hybrid offline-online design for uav-enabled data harvesting in probabilistic los channel. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020.
- [127] Mehmet R Yuce, Peng Choong Ng, and Jamil Y Khan. Monitoring of physiological parameters from multiple patients using wireless sensor network. *Journal of medical systems*, 32(5) :433–441, 2008.
- [128] Wu Yue and Zhu Jiang. Path planning for uav to collect sensors data based on spiral decomposition. *Procedia computer science*, 131 :873–879, 2018.
- [129] Ying-Gao Yue and Ping He. A comprehensive survey on the reliability of mobile wireless sensor networks : Taxonomy, challenges, and future directions. *Information Fusion*, 44 :188–204, 2018.
- [130] Cheng Zhan, Yong Zeng, and Rui Zhang. Trajectory design for distributed estimation in uav-enabled wireless sensor network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(10) :10155–10159, 2018.
- [131] Chunhua Zhang and John M Kovacs. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture : a review. *Precision agriculture*, 13(6) :693–712, 2012.
- [132] Daqiang Zhang, Jiafu Wan, Ching-Hsien Hsu, and Ammar Rayes. Industrial technologies and applications for the internet of things. *Computer Networks : The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 101(C) :1–4, 2016.
- [133] Ling Zhang and Cheng Wan. Dynamic path planning design for mobile sink with burst traffic in a region of wsn. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019, 2019.
- [134] Pengfei Zhang, Gaoxi Xiao, and Hwee-Pink Tan. Clustering algorithms for maximizing the lifetime of wireless sensor networks with energy-harvesting sensors. *Computer Networks*, 57(14) :2689–2704, 2013.