

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CALCUL DE LA TRAJECTOIRE DES UAV ET PLACEMENT DES
STATIONS DE BASE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR

SOPHIA BENBOUBKER

JANVIER 2024

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Toute ma gratitude envers la version de moi-même qui a persévéré pour mener à bien ce travail.

Un grand merci à mon directeur de recherche, le Pr. Elmahdi Driouch, pour son précieux encadrement et son soutien constant.

À mon mari bien-aimé, merci pour ton soutien infailible, dans les bons moments comme dans les plus difficiles.

À mes fils adorés, votre foi en moi et vos mots d'encouragement n'ont cessé de me motiver.

À mes nouvelles amies, Manel, Aya et Meriem, rencontrées à l'UQAM, vous êtes devenues mes sœurs de cœur. Votre soutien et vos précieuses aides ont été inestimables.

Un grand merci à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
RÉSUMÉ	x
CHAPITRE I INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Motivation	2
1.3 Problématique et objectif de recherche	4
1.4 Méthodologie et contributions	5
1.5 Organisation du mémoire	7
CHAPITRE II GÉNÉRALITÉS	8
2.1 Les réseaux de capteurs sans fil	8
2.2 Les UAV et les réseaux sans fil	9
2.2.1 Évolution de la technologie des UAV	9
2.2.2 Les UAV dans les réseaux sans fil	10
2.2.3 Classification des UAV	11
2.2.4 Technologies sans fil pour la communication avec les UAV	14
2.2.5 Réseaux assistés par UAV : Avantages et défis	17
2.3 Transfert d'énergie sans fil	22
2.4 Conclusion	25
CHAPITRE III ÉTAT DE L'ART	26
3.1 Les défis de déploiement des UAV	26
3.2 Les défis de la conception de la trajectoire des UAV	29
3.3 Durée de vie dans les WSN	33
3.3.1 Formation de clusters	34

3.3.2	Récupération d'énergie	36
3.4	Intégration de SWIPT dans les WSN	37
3.5	Optimisation de la trajectoire des UAV dans les WSN	39
3.6	Discussion	44
3.7	Conclusion	45
CHAPITRE IV CALCUL DE LA TRAJECTOIRE DES UAV ET PLACEMENT DES DÉPÔTS DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS		46
4.1	Modèle du système	46
4.1.1	Modélisation de la trajectoire de l'UAV	49
4.1.2	Modèle de communication UAV - SN	51
4.1.3	Modèle de la consommation de l'énergie des SN	54
4.1.4	Modèle de la consommation de l'énergie de l'UAV	55
4.2	Formulation du problème	57
4.3	Analyse de la complexité : \mathcal{NP} -difficulté	60
4.4	Solutions proposées	60
4.4.1	Solution heuristique KMeans-NN	61
4.4.2	Solution optimale avec <i>CPLEX</i>	64
4.5	Conclusion	65
CHAPITRE V ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS		66
5.1	Paramètres de simulation	66
5.2	Solutions de référence	67
5.2.1	BFE-NN	67
5.2.2	Random-NN	68
5.2.3	Optimal (BFE-Cplex)	68
5.2.4	Random-Cplex	68
5.2.5	Kmeans-Cplex	68
5.3	Comparaison des performances des solutions proposées	69

5.4 Conclusion	76
CONCLUSION	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	exigences de la communication pour les applications typiques des UAV (Zeng <i>et al.</i> , 2019a)	15
4.1	tableau de notations	49
5.1	tableau de paramètres	67
5.2	tableau de temps d'exécution des algorithmes en ($h : mm : ss$) . .	72

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 classification des UAV (Mozaffari <i>et al.</i> , 2019)	12
2.2 exemples de modèles de base pour les communications assistées par UAV (Zeng <i>et al.</i> , 2019a)	14
2.3 modes de vol de l’UAV pendant sa trajectoire pour le service des équipements au sol	21
2.4 SWIPT via des stations de base statiques et mobiles (Ponnimbaduge Perera <i>et al.</i> , 2018)	23
2.5 conceptions d’architecture de récepteur intégré pour SWIPT (Ponnimbaduge Perera <i>et al.</i> , 2018)	24
4.1 modèle du système	48
4.2 mode de service de l’UAV entre deux SN	51
4.3 mode de service de l’UAV entre un dépôt et un SN	52
4.4 solution optimale	65
5.1 exemple de trajectoires pour les six algorithmes proposés	70
5.2 temps moyen de la mission en fonction du nombre de capteurs	71
5.3 nombre moyen de recharges intermédiaires en fonction du nombre de capteurs	73
5.4 temps moyen de la mission en fonction de l’énergie maximale de l’UAV	74
5.5 temps moyen de la mission en fonction du nombre de dépôts	75

LISTE DES ACRONYMES

AoI	Âge de l'information (<i>Age of information</i>)
AS	Récepteur avec commutation d'antenne (<i>Antenna switching receiver</i>)
BS	Station de base (<i>Base station</i>)
BS-UAV	Station de base aérienne (<i>Aerial base station - Base station UAV</i>)
CH	Cluster Head
CNPC	Communication de contrôle et sans charge utile (<i>Control and non payload communication</i>)
DL	Liaison montante (<i>Downlink</i>)
EH	Collecte d'énergie (<i>Energy harvesting</i>)
FANET	Réseau ad hoc volant (<i>Flying ad hoc network</i>)
HAP	UAV de catégorie à haute altitude (<i>High altitude platform</i>)
IoT	Internet des objets (<i>Internet of Things</i>)
KKT	Les conditions de Karush-Kuhn-Tucker
LAP	UAV de catégorie à basse altitude (<i>Low altitude platform</i>)
LoS	Visibilité directe (<i>Line-of-Sight</i>)
MANET	Réseau mobile ad hoc (<i>Mobile ad hoc network</i>)
PL	Charge utile (<i>Payload</i>)
PS	Récepteur avec partage de puissance (<i>Power splitting receiver</i>)
P2P	pair à pair (<i>peer-to-peer</i>)
QoS	Qualité de service

SINR	Rapport signal sur interférence plus bruit (<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>)
SN	Capteur (<i>Sensor node</i>)
SR	Récepteurs séparés (<i>Separate receiver</i>)
SWIPT	Transfert sans fil simultané d'information et de puissance (<i>Simultaneous wireless information and power transfer</i>)
TDMA	Accès multiple par répartition temporelle (<i>Time division multiple access</i>)
TS	Récepteur avec commutation temporelle (<i>Time switching receiver</i>)
TSP	Problème du voyageur de commerce (<i>Traveling salesman problem</i>)
UAV	Véhicule aérien sans pilote (<i>Unmanned aerial vehicle</i>)
UE	Équipement utilisateur (<i>User equipment</i>)
UL	Liaison montante (<i>Uplink</i>)
VANET	Réseau ad hoc véhiculaire (<i>Vehicular ad hoc network</i>)
WPT	Transfert d'énergie sans fil (<i>Wireless power transfer</i>)
WRSN	Réseau de capteurs rechargeables sans fil (<i>Wireless rechargeable sensor network</i>)
WSN	Réseau de capteurs (<i>Wireless sensor network</i>)

RÉSUMÉ

De nos jours, avec l'expansion exponentielle de l'Internet des objets (en anglais *Internet of Things*, IoT) et le nombre croissant d'appareils connectés, la collecte et la gestion des données sont devenues des enjeux majeurs. Les réseaux de capteurs sans fil (en anglais *Wireless Sensor Networks*, WSN) jouent un rôle important en permettant la collecte et la transmission de données à partir de l'environnement physique. Pour améliorer encore davantage les performances des réseaux sans fil, les drones, également connus sous le nom de véhicules aériens sans pilote (en anglais *Unmanned Aerial Vehicle*, UAV), ont émergé comme une solution prometteuse. En effet, les réseaux assistés par UAV exploitent la mobilité et la flexibilité des UAV pour renforcer la connectivité, agir comme des relais de communication et même comme des stations de recharge sans fil. Cette convergence des réseaux sans fil et des UAV ouvre de nouvelles perspectives pour une connectivité améliorée et des performances optimisées. Cependant, il est crucial de prendre en compte les limitations des UAV en termes de fragilité et d'autonomie énergétique, ce qui restreint leur capacité à exécuter des missions de manière prolongée, surtout dans des systèmes à grande échelle. Ce projet de maîtrise s'intéresse à un WSN assisté par UAV pour la collecte de données et le transfert d'énergie simultanément. Nous envisageons également d'intégrer des stations de recharge et de collecte de données dans le modèle du système, permettant ainsi à l'UAV de se recharger au besoin le long de sa trajectoire et de transmettre les données de capteurs. L'objectif principal est de minimiser la durée de la mission de l'UAV en déterminant le placement des stations de recharge et la conception de la trajectoire, afin de répondre aux exigences énergétiques des capteurs et de l'UAV. En complément de la solution optimale complexe, nous proposons une approche heuristique pour résoudre le problème formulé, qui est l'algorithme Kmeans-NN. Cet algorithme repose sur une formation de clusters basée sur l'algorithme K-Means pour positionner les stations de recharge, et utilise l'algorithme glouton du plus proche voisin (en anglais *Nearest Neighbor*, NN) pour concevoir la trajectoire optimale de l'UAV. Les simulations confirment que la solution proposée s'approche de l'optimalité avec une complexité de calcul nettement inférieure à celle de la solution optimale.

Mots-clés : Réseaux assistés par UAV, Internet des objet, gestion énergétique, algorithme glouton, clustering.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Chaque seconde, 127 nouveaux objets se connectent à Internet, et selon les prévisions de Cisco, d'ici 2030, nous devrions compter 500 milliards d'appareils connectés (Alhassoun et Venkatasubramanian, 2020). Ces chiffres illustrent l'évolution majeure des réseaux sans fil au cours des dernières décennies. Notre société moderne exige la manipulation et le transfert instantané de quantités gigantesques de données dans tous les aspects de notre vie, ce qui requiert une qualité de service (QoS) irréprochable. Cette demande constante d'amélioration technologique a conduit à l'intégration de solutions innovantes pour répondre à ces besoins croissants.

Les réseaux de capteurs sans fil (en anglais *Wireless Sensor Networks*, WSN), qui constituent une composante clé de l'Internet des objets, jouent un rôle essentiel dans le monde des données et ont connu une évolution impressionnante dans de nombreux domaines. Ces réseaux se composent de capteurs autonomes et de nœuds de communication sans fil qui collaborent pour collecter, surveiller et transmettre des données provenant de l'environnement physique.

Les WSN sont utilisés dans une multitude d'applications, allant de la surveillance

environnementale à la gestion des ressources, en passant par la santé, la sécurité et l'industrie (Yetgin *et al.*, 2017). Les capteurs au sein d'un WSN sont capables de mesurer différentes grandeurs physiques telles que la température, l'humidité, la pression, la luminosité, le mouvement, etc. Les données collectées sont ensuite transmises à des nœuds de communication qui les acheminent vers un point central où elles sont traitées et analysées.

Les drones (appelés aussi *Unmanned Aerial Vehicle* UAV en anglais), autrefois réservés à des applications militaires, ont également trouvé leur place dans le domaine civil et se sont révélés être une solution prometteuse pour les réseaux sans fil. Grâce à leur mobilité, leur flexibilité et leur coût relativement bas, les UAV peuvent apporter une contribution significative à l'amélioration des performances des réseaux sans fil. Nous parlons alors de réseaux assistés par UAV.

Un réseau assisté par UAV est un réseau de communication sans fil dans lequel les UAV sont utilisés pour renforcer, améliorer ou étendre la connectivité. Ces véhicules aériens sans pilote peuvent être déployés de manière flexible pour fournir une couverture supplémentaire dans les zones présentant une faible connectivité ou difficilement accessibles. Ils peuvent également améliorer les performances du réseau en agissant comme des relais de communication, des points d'accès mobiles ou des stations de recharge sans fil.

1.2 Motivation

Avec le développement et l'évolution de l'IoT, les capteurs sont largement déployés, ce qui pose un défi majeur à cause du besoin de collecter une énorme quantité de données. Par conséquent, il est essentiel que les techniques de collecte de données de l'IoT soient caractérisées par une consommation énergétique réduite, des délais de communication courts et une grande fiabilité. La combinaison

de la collecte de données et du transfert d'énergie assistée par UAV présente de nombreux avantages. Notamment, les UAV offrent une grande agilité, une grande flexibilité et un faible coût. Cela permet de compenser la consommation d'énergie des capteurs, qui souffrent souvent de limitations d'énergie, et ainsi de prolonger la durée de vie du WSN.

Les avantages clés de la combinaison de la collecte de données et du transfert d'énergie assistée par UAV pour un WSN sont les suivants (Wei *et al.*, 2022) :

- Efficacité élevée de la collecte de données : les UAV optimisent leur trajectoire pour réduire le temps de collecte de données, permettant ainsi une collecte rapide et efficace des données des capteurs.
- Transfert d'énergie sans fil : les UAV peuvent transférer de l'énergie aux capteurs sans fil, améliorant ainsi la durée de vie du réseau et garantissant une alimentation continue des capteurs.
- Large couverture et communication fiable : grâce à leur altitude élevée, les UAV établissent des liaisons de communication en visibilité directe (en anglais *Line of Sight*, LoS) avec les capteurs, augmentant significativement les chances de succès et l'étendue de la communication. Cela garantit une transmission fiable des données entre les capteurs et les UAV.

Cependant, l'utilisation des UAV dans les réseaux sans fil présente également des défis conceptuels et techniques. L'optimisation du déploiement en trois dimensions (3D) ainsi que de la trajectoire des UAV sont des problèmes complexes qui nécessitent des recherches approfondies. De plus, la coordination des UAV pour le transfert d'énergie et la collecte de données nécessite une gestion efficace des ressources et des protocoles de communication adaptés. Sans oublier la limitation de l'autonomie énergétique de l'UAV.

1.3 Problématique et objectif de recherche

La synthèse des travaux de recherche existants nous a permis de déterminer une lacune importante : l'absence de prise en compte de la contrainte énergétique des UAV dans les problématiques liées à la trajectoire de ces derniers. Cette constatation nous a poussé à nous intéresser de plus près au prolongement de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil assistés par UAV, en mettant en évidence cette contrainte énergétique.

En intégrant la technologie des UAV dans les réseaux sans fil, nous mettons en avant les nombreux avantages de cette approche pour améliorer les performances des systèmes. Les recherches se concentrent principalement sur des solutions d'intégration, de conception de placement 3D et de trajectoire, qui constituent des problématiques importantes. Cependant, il est crucial de prendre en compte le fait que les UAV sont des engins fragiles et limités en autonomie énergétique, ce qui limite leur capacité à exécuter des missions de manière prolongée, notamment dans les systèmes à grande échelle. Cette limitation peut entraîner un dysfonctionnement du système.

De plus, le positionnement stratégique des stations de recharge d'alimentation pour les UAV peut garantir une amélioration des performances des réseaux sans fil assistés par UAV. En déterminant de manière optimale le nombre et les emplacements de ces stations, les UAV peuvent accomplir leurs missions de manière continue et efficace, évitant ainsi les interruptions et les déviations inutiles de leur trajectoire. Ainsi, l'optimisation du positionnement des stations de recharge joue un rôle important dans l'amélioration globale des performances des réseaux assistés par UAV.

Notre objectif global est de minimiser la durée de la mission de l'UAV

dans un réseau de capteurs sans fil, tout en optimisant le placement des stations de recharge et de collecte de données et la trajectoire de l'UAV, en répondant aux demandes énergétiques des capteurs et en respectant les contraintes d'autonomie de l'UAV.

1.4 Méthodologie et contributions

Dans le but d'atteindre notre objectif énoncé précédemment, nous entamons notre étude en établissant une modélisation mathématique du système étudié, ce qui nous permettra d'identifier tous les éléments pertinents liés au réseau et à son environnement. Par la suite, nous formulons un problème d'optimisation combinatoire visant à minimiser la durée de la mission de l'UAV, tout en respectant les contraintes relatives à l'énergie maximale de l'UAV et au positionnement des stations de recharge et de collecte de données que nous allons appeler dépôts.

Nous procédons à une évaluation de la complexité du problème, et nous démontrons qu'il est \mathcal{NP} -difficile, ce qui signifie qu'il est extrêmement difficile de trouver un algorithme capable de le résoudre en temps polynomial. Cela souligne les défis associés à la résolution efficace de ce problème.

Afin de résoudre notre problématique, nous proposons deux approches distinctes, chacune présentant ses avantages et ses inconvénients. La première approche repose sur un algorithme glouton en deux phases. Dans la première phase, des clusters sont construits en positionnant les dépôts aux niveaux de leurs centroïdes. Dans la deuxième phase, une trajectoire optimisée pour l'UAV est conçue en prenant en compte les arrêts de téléversement de données et de recharge intermédiaire au niveau des dépôts. Cette approche offre une solution simple et efficace.

La deuxième approche repose sur un algorithme d'optimisation plus sophistiqué mais qui souffre malheureusement d'une grande complexité algorithmique. Ceci

rend cette solution viable uniquement pour des réseaux de petite taille. Nous intégrons la formulation de l'objectif dans un solveur, ce qui permet de bénéficier de l'optimisation des calculs et des techniques avancées offertes par ces outils. Cette approche permet une exploration plus approfondie de l'espace de recherche et offre la possibilité de trouver des solutions optimales ou quasi-optimales au problème posé.

Il est important de souligner que les deux algorithmes proposés nécessitent une évaluation de leurs complexités de calcul respectives, afin de déterminer la faisabilité de leur implémentation pratique. Cette évaluation permettra également de comparer les performances des deux approches et de choisir la plus adaptée en fonction des contraintes spécifiques du système étudié.

Les principales contributions de notre travail peuvent être résumées comme suit :

- Nous formulons un problème d'optimisation de la trajectoire en tenant compte des contraintes énergétiques de l'UAV et du positionnement des dépôts, dans le but de minimiser la durée de la mission de l'UAV.
- Nous étudions la complexité de calcul du problème formulé et démontrons qu'il s'agit d'un problème \mathcal{NP} -difficile. Cette démonstration met en évidence la complexité de trouver une solution optimale en un temps raisonnable, ce qui nécessite le recours à des techniques d'optimisation avancées.
- Nous proposons, d'une part, un algorithme heuristique glouton qui offre une solution sous-optimale en temps polynomial. Cet algorithme permet une résolution efficace du problème tout en réduisant la complexité de calcul. D'autre part, nous présentons une solution optimale obtenue grâce à l'implémentation de la formulation proposée au niveau d'un solveur.
- Nous évaluons les performances des deux solutions proposées à travers des simulations approfondies. Nous comparons ces solutions avec d'autres al-

algorithmes afin de démontrer leur efficacité en termes de durée de mission optimisée et de qualité de la trajectoire.

1.5 Organisation du mémoire

Le reste de ce mémoire est organisé de la manière suivante : le chapitre 2 offre une vue d'ensemble et des notions de base sur les réseaux de capteurs, la technologie des UAV et les différentes technologies de transfert de l'énergie sans fil. Le chapitre 3 présente un état de l'art des travaux liés à notre problématique. Le modèle de système, la formulation du problème, l'étude de sa complexité ainsi que les solutions proposées sont détaillées dans le chapitre 4. Les résultats de simulations sont exposés dans le chapitre 5. Enfin, le chapitre de conclusion résume notre travail.

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS

Afin de mieux cadrer notre problématique, nous présentons dans ce chapitre les concepts généraux liés aux réseaux de capteurs sans fil assistés par les UAV. D'abord, nous allons définir les réseaux de capteurs et leur rôle important dans différents domaines d'application. Ensuite, nous allons introduire la technologie des UAV, tout en présentant comment cette évolution technologique a pu se servir de la mobilité, de la flexibilité et de l'altitude adaptative des UAV pour améliorer les réseaux sans fil. Enfin, nous allons aborder le volet de l'autonomie énergétique et les différentes technologies de transfert de l'énergie.

2.1 Les réseaux de capteurs sans fil

Un WSN est un réseau composé d'un grand nombre de nœuds autonomes appelés capteurs, qui utilisent des liaisons sans fil pour communiquer. Le rôle d'un capteur est de recueillir l'information et détecter certains événements significatifs dans son environnement et les transmettre sous forme de données à un centre de collecte et de traitement.

Les fonctionnalités des capteurs permettent au WSN d'offrir un grand nombre de scénarios d'utilisation. Par exemple, l'un des premiers domaines d'application des WSN est la surveillance de l'environnement, allant du suivi des troupeaux

d'animaux à la surveillance des zones difficiles d'accès (Yetgin *et al.*, 2017). Un WSN peut être aussi exploité pour des besoins militaires, surtout en territoire inaccessible ou hostile. En plus, le déploiement de WSN peut être très utile pour améliorer la logistique, en surveillant par exemple la température des conteneurs afin d'assurer la qualité. Le domaine de la santé offre un autre ensemble important de scénarios d'utilisation des WSN, notamment ils permettent aux soignants de surveiller l'état des patients à l'hôpital ou en maison de retraite. Sans oublier le contrôle du niveau de rayonnement, le niveau du gaz explosif et la détection des fuites, et le contrôle des zones réglementées qui font également partie des applications potentielles de sécurité et d'urgence des WSN (Yetgin *et al.*, 2017).

Toutefois, les capteurs sont des dispositifs fragiles qui présentent des limitations de mémoire, de puissance et de capacité de calcul ainsi que des défis liés à la recharge ou au remplacement de la batterie (Dash et Khuntia, 2020). Par conséquent, ces limitations ont un impact négatif sur la durée de vie des WSN qui est un critère de performance important dans ce type de réseau.

2.2 Les UAV et les réseaux sans fil

2.2.1 Évolution de la technologie des UAV

Au début du 20^e siècle, la technologie des UAV était limitée au domaine militaire. Malgré leur champ d'application restreint, les premiers développements de cette technologie ont fourni une base importante pour la révolution des UAV commerciaux modernes. C'est au milieu des années 2000 que l'utilisation des UAV a été élargie dans d'autres domaines civils tels que la livraison, la surveillance, les secours en cas de catastrophe, la recherche, le sauvetage ; la liste est longue. En 2006, le premier permis d'UAV commercial a été délivré. Par la suite, la société française Parrot a produit son « Parrot AR UAV » en 2010. C'est un UAV qui implémente

un module de communication sans fil Wi-Fi. En 2013-2014, les sociétés Amazon et Google lancent des projets de déploiement d'UAV à des fins de livraison (Saad *et al.*, 2020).

Actuellement, les UAV sont devenus plus autonomes et polyvalents en combinant des techniques de communication et d'apprentissage automatique. De plus, la technologie des UAV a surpassé les domaines cités auparavant et joue un rôle important dans la communication sans fil, notamment dans l'internet des objets (en anglais *Internet of Things*, IoT), la télédétection et la réalité virtuelle.

2.2.2 Les UAV dans les réseaux sans fil

Avec la forte présence des communications sans fil dans le quotidien de l'être humain, les exigences en termes de fiabilité, de rentabilité et de qualité de service sont de plus en plus élevées. L'évolution et les capacités des UAV offrent des opportunités prometteuses pour répondre à ces exigences. En effet, l'intégration optimale des UAV dans les réseaux sans fil est une solution qui permet de bonifier l'infrastructure des réseaux afin d'améliorer leurs performances (Mozaffari *et al.*, 2019). Par définition, un réseau de communication sans fil où les UAV sont utilisés pour renforcer, améliorer ou étendre la connectivité est appelé un réseau assisté par UAV.

Les UAV peuvent jouer plusieurs rôles dans un réseau sans fil. D'une part, on peut les utiliser comme stations de base aériennes (BS-UAV) qui viennent en soutien des stations terrestres. Les BS-UAV améliorent les performances du réseau en exploitant leur capacité à ajuster l'altitude et à éviter les obstacles. En plus, dans le cas où la construction d'une infrastructure cellulaire complète est coûteuse, le déploiement des BS-UAV devient très bénéfique. Parmi les avantages d'utilisation des BS-UAV, nous retrouvons notamment leur capacité à ajuster leur position

afin d'améliorer la probabilité d'établir des liaisons de communication en visibilité directe (en anglais *Line-of-sight*, LoS) avec les utilisateurs au sol (Mozaffari *et al.*, 2019). D'autre part, l'UAV peut fonctionner comme équipement utilisateur aérien (en anglais *User Equipment*, UE) au sein d'un réseau. Par exemple, dans le contexte de l'IoT, les équipements sans fil au sol peuvent utiliser les UAV comme capteurs pour la diffusion, la collecte, le stockage ou le transfert des données.

En plus de ces deux rôles, les UAV peuvent également combiner leurs fonctionnalités et avantages pour jouer le rôle de relais. En tant que relais, les UAV agissent comme des intermédiaires mobiles entre les différents équipements et stations de base au sein d'un réseau sans fil. Ils sont capables de collecter, de transmettre des données, de relayer des signaux, voire de recharger des équipements au sol. Cette capacité de relais contribue à améliorer la couverture du réseau, à optimiser l'efficacité des communications et à étendre la portée des services sans fil. Ainsi, les UAV deviennent des composants clés pour garantir une connectivité robuste et fiable dans une variété d'applications.

2.2.3 Classification des UAV

Pratiquement, nous pouvons distinguer plusieurs types d'UAV en fonction de leurs domaines d'application. En effet, il n'existe pas de norme unique pour la classification des UAV. Cependant, ils peuvent être classés en différentes catégories en fonction de différents critères, tels que la capacité, le poids, la taille, l'endurance, la configuration de la voilure, les méthodes de contrôle, l'autonomie, l'altitude de vol, la vitesse maximale et les méthodes de recharge énergétique (Zeng *et al.*, 2019a).

Dans le domaine de la recherche des réseaux sans fil, les UAV sont classés principalement selon deux facteurs : l'altitude de vol et la configuration des ailes. Comme

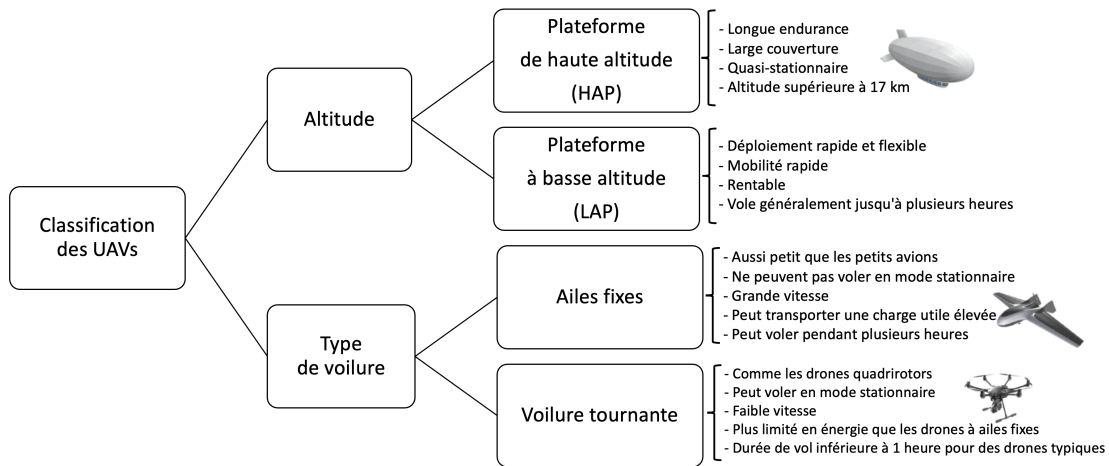


FIGURE 2.1 – classification des UAV (Mozaffari *et al.*, 2019)

le montre la figure 2.1, on différencie entre les UAV appartenant à la catégorie à haute altitude (en anglais *High altitude platform*, HAP) et à la catégorie à basse altitude (en anglais *Low altitude platform*, LAP). Les HAPs peuvent voler à une altitude de 17 km et demeurent quasi stationnaires, par contre les LAPs sont rapides et flexibles, car ils ne volent qu'entre une dizaine de mètres et quelques kilomètres. En plus de l'altitude, la classification des UAV se fait par le type de leurs voilures : aile fixe (en anglais *fixed-wing*) ou voilure tournante (en anglais *rotary-wing*). Cette classification considère les critères de poids, de vitesse, de consommation d'énergie et de trajectoire de l'UAV (Mozaffari *et al.*, 2019). Par exemple, si le besoin est d'intégrer une station de base aérienne stationnaire, il faut choisir un UAV équipé de voilures tournantes, contrairement à un UAV à aile fixe qui ne peut pas maintenir une position stationnaire.

La communication sans fil est une composante essentielle pour les UAV. D'une part, les UAV doivent échanger des informations avec diverses parties, telles que les pilotes à distance, les véhicules aériens à proximité et les contrôleurs du trafic aérien, afin de garantir la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des opérations de

vol. C'est ce qu'on appelle communément la communication de contrôle et sans charge utile (en anglais *control and non payload communication*, CNPC). D'autre part, les UAV échangent des données utiles liées à leur type de mission avec des équipements utilisateurs ou des stations de base au sol. Par exemple, des images aériennes, des vidéos et des paquets de données à relayer à destination ou en provenance des entités au sol. C'est ce qu'on appelle la communication de la charge utile (en anglais *payload*, PL) (Zeng *et al.*, 2019a).

Étant un équipement aérien, l'UAV communique avec les équipements au sol selon différents modèles de communication. Premièrement, l'UAV peut jouer le rôle d'un relais, où il relaye la communication du nœud source au nœud de destination comme le montre la figure 2.2. Deuxièmement, il peut communiquer exclusivement en liaison montante (en anglais *Uplink*, UL) ou en liaison descendante (en anglais *downlink*, DL) avec les nœuds. Troisièmement, l'UAV peut activer la multidiffusion, où il transmet des informations communes à plusieurs nœuds terrestres (Zeng *et al.*, 2019a).

Les UAV sont reconnus pour leur polyvalence et leur large éventail d'applications rendues possibles grâce à l'utilisation des technologies sans fil. Chaque domaine d'utilisation impose un certain nombre d'exigences sur le plan de la qualité de service de la communication comme le montre le tableau 2.1. Par exemple, pour que l'UAV prenne en charge la transmission d'une vidéo haute définition à l'utilisateur au sol, il faut que le débit de transmission soit de plusieurs mégabits par seconde (Mb/s), tandis que pour une vidéo 4K, il doit être supérieur à 30 Mb/s (Zeng *et al.*, 2019a).

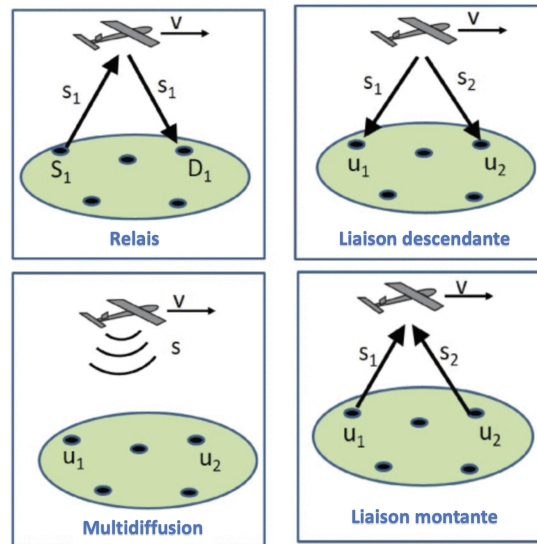


FIGURE 2.2 – exemples de modèles de base pour les communications assistées par UAV (Zeng *et al.*, 2019a)

2.2.4 Technologies sans fil pour la communication avec les UAV

Afin d'effectuer une communication sans fil air-air ou air-sol, l'UAV fait appel à une des liaisons suivantes (1) la liaison directe, (2) satellite, (3) réseau mobile ad hoc et (4) réseau cellulaire (Zeng *et al.*, 2019a).

1. **Liaison directe (en anglais *Direct Link*)** : la liaison directe entre un UAV et un nœud au sol a été la méthode la plus couramment utilisée pour les UAV commerciaux dans le passé (Zeng *et al.*, 2019a). En effet, cette liaison est simple à implémenter et présente un coût relativement bas. Dans un environnement urbain, la liaison directe est souvent bloquée par des obstacles, ce qui diminue le débit et la fiabilité de la communication. En revanche, dans un environnement sans obstacles, cette liaison est considérée comme la solution la mieux adaptée, offrant de meilleures performances.
2. **Satellite** : les satellites peuvent aider à relayer les données transmises entre

Application UAV	Altitude pour couverture (en m)	Latence du trafic de PL (en ms)	Débit de PL (DL/UL)
<i>Livraison par UAV</i>	100 m	500 ms	300 Kbps/200 Kbps
<i>Filmer avec UAV</i>	100 m	500 ms	300 Kbps/30 Mbps
<i>Point d'accès</i>	500 m	500 ms	50 Mbps/50 Mbps
<i>Surveillance</i>	100 m	3000 ms	300 Kbps/10 Mbps
<i>Inspection des infra-structures</i>	100 m	3000 ms	300 Kbps/10 Mbps
<i>Exposition de la flotte d'UAV</i>	200 m	100 ms	200 Kbps/200 Kbps
<i>Agriculture de précision</i>	300 m	500 ms	300 Kbps/200 Kbps
<i>Recherche et sauvetage</i>	100 m	500 ms	300 Kbps/6 Mbps

TABLEAU 2.1 – exigences de la communication pour les applications typiques des UAV (Zeng *et al.*, 2019a)

des UAV très éloignés et des passerelles au sol, grâce à leur large couverture géographique. Ceci est particulièrement utile pour les UAV au-dessus de l'océan et dans les régions éloignées où la couverture du réseau terrestre (Wi-Fi ou cellulaire) est non disponible (Zeng *et al.*, 2019a). En revanche, cette solution prometteuse a plusieurs défis. Les longues distances entre le satellite, l'UAV et les équipements au sol causent des affaiblissements de propagation et des délais considérables. En plus, les UAV sont généralement soumis à des contraintes strictes en termes de taille, de poids et de consommation d'énergie, ce qui restreint leur capacité à transporter des équipements

de communication satellite volumineux, lourds et énergivores, tels que des antennes paraboliques (Zeng *et al.*, 2019a).

3. **Réseau mobile ad hoc** : le réseau mobile ad hoc (en anglais *Mobile ad hoc networks*, MANET) est un réseau sans infrastructure et dynamiquement auto-organisé qui permet des communications pair-à-pair (P2P) entre les appareils mobiles (Zeng *et al.*, 2019a). Le réseau ad hoc véhiculaire (en anglais *Vehicular ad hoc network*, VANET) et le réseau ad hoc volant (en anglais *Flying ad hoc network*, FANET) sont deux formes de MANET qui permettent de prendre en charge les communications entre les véhicules terrestres à haute mobilité et les UAV dans les réseaux à deux et trois dimensions respectivement (İlker Bekmezci *et al.*, 2013). FANET est un réseau robuste et flexible qui permet d'assurer des communications UAV dans un petit réseau. Par contre, il existe des complexités et des difficultés afin de réaliser un protocole de routage fiable sur l'ensemble du réseau avec une connectivité dynamique entre les UAV. Par conséquent, FANET est généralement incapable de fournir une solution évolutive pour desservir des UAV déployés à grande échelle (Zeng *et al.*, 2019a).
4. **Réseau cellulaire** : avec la croissance du nombre des UAV et de leurs domaines d'applications dans les réseaux sans fil, il a été primordial d'intégrer la technologie UAV dans le réseau cellulaire. Grâce à l'ubiquité quasi mondiale du réseau cellulaire ainsi que sa liaison optique à haut débit et de ses technologies de communication avancées, les exigences de communication pour les UAV peuvent être potentiellement satisfaites, quelle que soit la densité des UAV ainsi que leurs distances avec les nœuds terrestres correspondants (Zeng *et al.*, 2019a).

Le déploiement d'un UAV en tant qu'équipement réseau est plus facile et moins coûteux qu'un équipement ordinaire pour plusieurs raisons :

- Les UAV sont facilement déployables et déplaçables, ce qui facilite leur intégration dans un réseau sans fil pour fournir une couverture de communication temporaire ou ciblée dans des zones où l’installation d’une infrastructure terrestre serait problématique.
- Les UAV offrent une connectivité dans des zones éloignées et difficiles d’accès où l’installation d’une infrastructure terrestre est impossible ou non rentable.
- Les UAV offrent des avantages économiques grâce à des coûts d’installation et de maintenance réduits par rapport aux équipements terrestres. Leur utilisation flexible permet également des économies en évitant l’installation de stations de base permanentes.
- Les UAV sont pratiques lors de situations d’urgence, car ils peuvent être rapidement déployés pour établir une connectivité de communication vitale et fournir une couverture temporaire.

Malgré ses opportunités prometteuses, il y aura toujours des défis techniques qui accompagnent un réseau assisté par UAV. Nous citons par exemple l’absence du réseau dans les endroits lointains comme les océans et les forêts, ainsi que la gestion des interférences, et essentiellement la gestion du placement 3D et la trajectoire des UAV. Ces deux derniers points seront détaillés par la suite dans ce chapitre.

2.2.5 Réseaux assistés par UAV : Avantages et défis

Dans les systèmes IoT, l’intégration des UAV propose plusieurs avantages permettant l’amélioration de leur performance. Le déploiement des UAV comme stations de base volantes peut fournir des communications de liaison montante ou descendante fiables et économes en énergie. En outre, grâce à son déploiement et sa mobilité à haute altitude, l’UAV permet de réduire les effets d’ombrage (en anglais *shadowing*) et de blocage qui représentent les principales causes d’atténuation du signal dans les liaisons sans fil. En plus, les appareils IoT peuvent utiliser une

puissance nettement inférieure pour transmettre leurs données directement aux UAV. Pour résumer, les UAV peuvent être placés en fonction des emplacements des appareils IoT, permettant à ces appareils de se connecter avec succès au réseau en utilisant une puissance de transmission réduite. Ainsi, en exploitant les caractéristiques des UAV, la connectivité et l'efficacité énergétique des réseaux IoT peuvent être considérablement améliorées (Mozaffari *et al.*, 2019).

Cependant, les réseaux assistés par UAV font face à plusieurs défis liés à la consommation d'énergie des UAV. Ces défis comprennent le placement des UAV, la gestion des ressources, l'association avec les utilisateurs, l'optimisation du temps de vol et la trajectoire des UAV. De plus, les caractéristiques physiques des UAV, telles que leur taille, leur poids et leur vitesse, doivent également être prises en compte. Ainsi, il est crucial de développer des mécanismes de déploiement et de transmission écoénergétiques pour augmenter la durée de vie des réseaux de communication sans fil assistés par UAV. (Shakoor *et al.*, 2019).

Le déploiement de l'UAV dans un réseau sans fil peut être classifié selon deux catégories. La première catégorie est le placement quasi stationnaire. Dans cette catégorie, le déploiement des UAV se fait en spécifiant un emplacement 3D stationnaire durant un temps prédéfini par la durée de la mission. Dans une telle configuration, plusieurs efforts de recherche ont été consacrés à l'optimisation du placement des UAV et à l'analyse des performances en tenant compte des caractéristiques du canal de communication UAV-sol. Dans la deuxième catégorie, les UAV sont utilisés comme un équipement réseau volant qui exécute sa mission en suivant une trajectoire. En effet, c'est un déploiement qui permet de tirer profit de la mobilité de l'UAV en plus de son positionnement en altitude. Dans une telle configuration, les travaux de recherche se sont concentrés sur l'optimisation de la trajectoire des UAV et l'analyse des performances en tenant compte de divers facteurs tels que l'évitement de collisions, la demande des utilisateurs terrestres,

les contraintes énergétiques et la durée du vol (Zeng *et al.*, 2019a)(Lakew *et al.*, 2020).

2.2.5.1 Placement optimal de l'UAV

Contrairement aux équipements terrestres, les UAV sont plus difficiles à placer à cause de plusieurs facteurs tels que l'environnement de déploiement (par exemple, la zone géographique), les emplacements des utilisateurs au sol et les caractéristiques du canal UAV-sol qui dépend principalement de l'altitude de l'UAV. Les UAV peuvent être déployés à différentes altitudes selon la situation et les demandes des utilisateurs. Cependant, en ajustant l'altitude d'un UAV, sa zone de couverture (Shakoor *et al.*, 2019) ainsi que sa consommation de l'énergie sont modifiées. De plus, le déploiement simultané de plusieurs UAV devient plus difficile en raison de l'impact des interférences inter UAV sur les performances du système. Sans oublier que lors du déploiement des UAV, leurs contraintes de temps de vol et d'énergie doivent également être prises en compte, car elles ont un impact direct sur les performances du réseau (Mozaffari *et al.*, 2019).

Afin de maximiser la couverture au sol, certains travaux ont étudié l'optimisation du placement d'un ou de plusieurs UAV. Dans l'article (Al-Hourani *et al.*, 2014), une optimisation du placement d'un UAV a été proposée pour maximiser la couverture au sol, et cela en cherchant un compromis entre la présence d'une liaison LoS et l'affaiblissement de propagation (en anglais *path loss*) lorsqu'une BS-UAV est déployée à haute et basse altitude. Dans l'article (Kalantari *et al.*, 2016), une autre solution a été proposée qui permet d'obtenir le placement optimal de plusieurs UAV afin de minimiser le nombre d'UAV à deployer tout en maximisant leur couverture. Le placement de l'UAV peut également être conçu pour maximiser directement le débit du système (Zeng *et al.*, 2019a). Par exemple dans l'article (He

et al., 2018), une optimisation conjointe de l'altitude de l'UAV et de l'ouverture du faisceau de son antenne a été étudiée pour maximiser le débit dans trois modèles de communication multi-utilisateurs fondamentaux, à savoir la multidiffusion en liaison descendante, la diffusion en liaison descendante et l'accès multiple en liaison montante. Le placement optimal de plusieurs BS-UAV peut aussi être conçu dans le but d'optimiser les délais de communication du réseau (Sharma *et al.*, 2016) ou d'optimiser l'efficacité énergétique de la collecte des données dans un réseau IoT (Mozaffari *et al.*, 2017).

2.2.5.2 Optimisation de la trajectoire de l'UAV

La mobilité de l'UAV offre une flexibilité et une liberté supplémentaires aux réseaux sans fil par rapport à son déploiement quasi stationnaire. Puisque l'UAV peut voler à proximité des équipements au sol, alors il peut fournir une liaison de communication directe et à basse altitude avec chaque équipement, ce qui permet de mieux répondre aux besoins de la communication. Par exemple, dans le cadre de l'IoT, des UAV peuvent être déployés pour collecter les données des nœuds au sol en survolant la totalité de la zone géographique du réseau. Donc, la trajectoire de l'UAV nécessite d'être soigneusement optimisée afin d'assurer les performances du réseau en termes de débit, de l'âge de l'information collectée, de la consommation énergétique et de la durée de vie du réseau.

En général, l'optimisation de la trajectoire de l'UAV doit prendre en considération différentes variables pertinentes liées à la conception de la communication durant le temps, comme la puissance de transmission, la bande passante, le temps, la consommation de l'énergie, la formation de faisceaux, etc. Ceci dit, on se retrouve souvent confronté à des problématiques très difficile à relever. D'une part, les problèmes formulés par les articles de recherche sont généralement non convexes

par rapport aux variables de la communication et de la trajectoire. D'autre part, la trajectoire est une variation de localisation durant le temps du vol, donc c'est une optimisation en temps continu qui se traduit par des variables continues, ce qui rend le problème parfois encore plus difficile à aborder (Zeng *et al.*, 2019a).

Il existe plusieurs contraintes qui rendent l'optimisation de la trajectoire de l'UAV volant plus complexe. En effet, la trajectoire de l'UAV pourrait être influencée par les contraintes liées aux limites mécaniques de l'UAV, les exigences de la mission ou les réglementations de vol imposées par les autorités gouvernementales. Par exemple, nous pouvons citer les contraintes de l'altitude maximale et minimale, du point de départ et d'arrivée, de la vitesse maximale et minimale, de l'évitement des obstacles et de l'évitement de collision (Zeng *et al.*, 2019a).

Lorsqu'un UAV dessert un équipement au sol, par exemple un capteur (en anglais *Sensor Node*, SN), il utilise un des trois modes suivants (Jia *et al.*, 2019) : (a) mode en vol stationnaire, (b) mode en vol continu et (c) mode hybride. L'opération de desservir un capteur peut inclure plusieurs tâches dont la collecte des données capturées, la recharge sans fil, la communication de contrôle, etc.

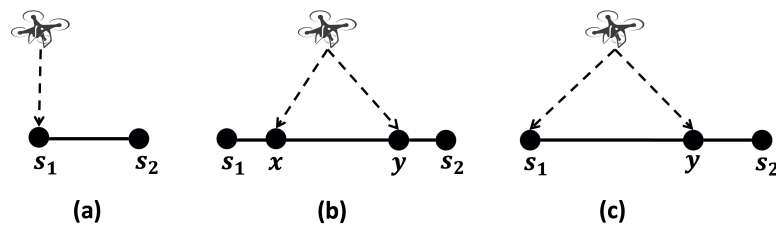


FIGURE 2.3 – modes de vol de l'UAV pendant sa trajectoire pour le service des équipements au sol

- a) **Mode en vol stationnaire** : comme illustré dans la figure 2.3-(a), l'UAV se positionne au-dessus du capteur s_1 , le dessert, puis se dirige vers le capteur suivant s_2 en atteignant sa vitesse maximale. L'UAV survole le capteur à sa

position pendant toute la durée du service. (Baek *et al.*, 2020b).

- b) **Mode en vol continu** : comme illustré dans la figure 2.3-(b), l’UAV survole le capteur s_1 , puis démarre son service depuis la position x pour le terminer à la position y . Ensuite, il poursuit son vol en direction du capteur s_2 . Lorsque l’UAV n’est pas en communication avec les capteurs, c’est-à-dire en dehors de l’intervalle $[x, y]$, il accélère à sa vitesse maximale pour minimiser la durée de sa mission.
- c) **Mode hybride** : comme illustré dans la figure 2.3-(c), l’UAV se positionne au-dessus du capteur s_1 . Il commence son service pendant une période donnée, puis continue sa tâche tout en se dirigeant vers le capteur suivant s_2 . L’UAV arrête de desservir s_1 à la position y .

2.3 Transfert d’énergie sans fil

L’efficacité énergétique est l’un des défis primordiaux des réseaux sans fil. Afin d’améliorer la performance et la durée de vie des réseaux sans fil, la technologie de transfert sans fil simultané d’information et de puissance (en anglais *simultaneous wireless information and power transfer*, SWIPT) est une solution prometteuse surtout lorsqu’elle est utilisée au niveau des UAV.

En effet, le concept de transfert d’énergie sans fil (en anglais *Wireless power transfer*, WPT) a été introduit en 1891 par Tesla (Hossain *et al.*, 2019). Le système WPT est composé (i) d’un émetteur connecté à une source d’alimentation principale, qui transforme l’alimentation principale en un champ électromagnétique fluctuant dans le temps, et (ii) d’un ou plusieurs dispositifs récepteurs conçus pour recevoir et récupérer l’énergie du champ électromagnétique (Ponnimbaduge Perera *et al.*, 2018). Toutefois, à cause du transfert élevé de la puissance, cette technologie était dangereuse à utiliser. Durant les dernières années, WPT a retrouvé sa

place dans la recherche grâce à la possibilité de transférer de faibles puissances et d'utiliser des équipements à faible énergie (Hossain *et al.*, 2019).

SWIPT est une technique développée à partir de diverses technologies WPT et qui permet le transfert simultané d'informations et de puissance d'une manière sans fil. SWIPT peut entraîner des gains notables au niveau de la consommation d'énergie, de l'efficacité spectrale, de la gestion des interférences et de la latence en permettant de transporter en même temps la puissance et l'information (Ponnimbaduge Perera *et al.*, 2018).

En plus, la collecte d'énergie (en anglais *energy harvesting*, EH) est une solution rentable, adaptée et sûre pour alimenter les batteries des dispositifs sans fil. Donc SWIPT est la technique la plus adaptée, car elle fournit une efficacité spectrale en fournissant de l'énergie et des informations aux nœuds en même temps.

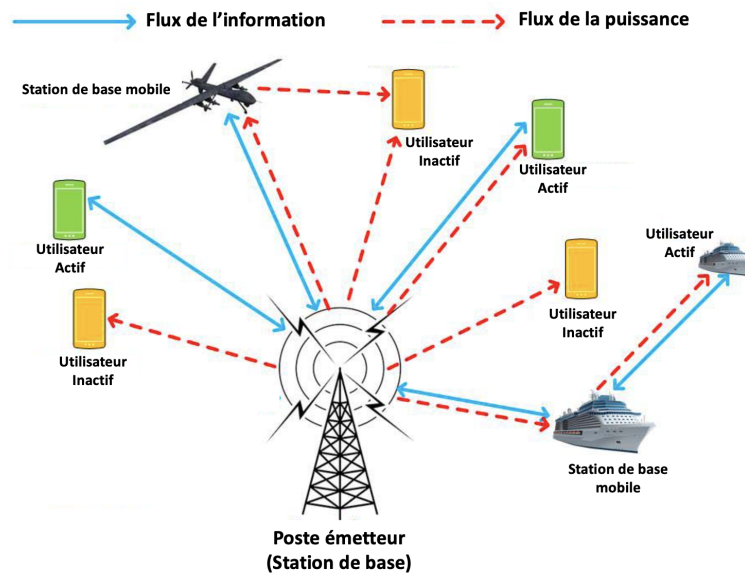


FIGURE 2.4 – SWIPT via des stations de base statiques et mobiles (Ponnimbaduge Perera *et al.*, 2018)

Pour résumer, voici la liste des avantages de SWIPT (Hossain *et al.*, 2019) :

- Alimentation électrique et échange d'informations simultanément.
- Efficacité spectrale élevée.
- Efficacité énergétique assurée.
- Prolongation de la durée de vie des équipements réseau difficiles d'accès et ayant une autonomie limitée.
- Système de communication respectueux de l'environnement, réduisant l'impact sur l'environnement.
- Atténuation des effets de l'affaiblissement de propagation et prise en charge des débits élevés et de la durabilité énergétique
- Implémentation facile par rapport à d'autres technologies
- Bonne gestion des interférences et réduction du délai de transmission

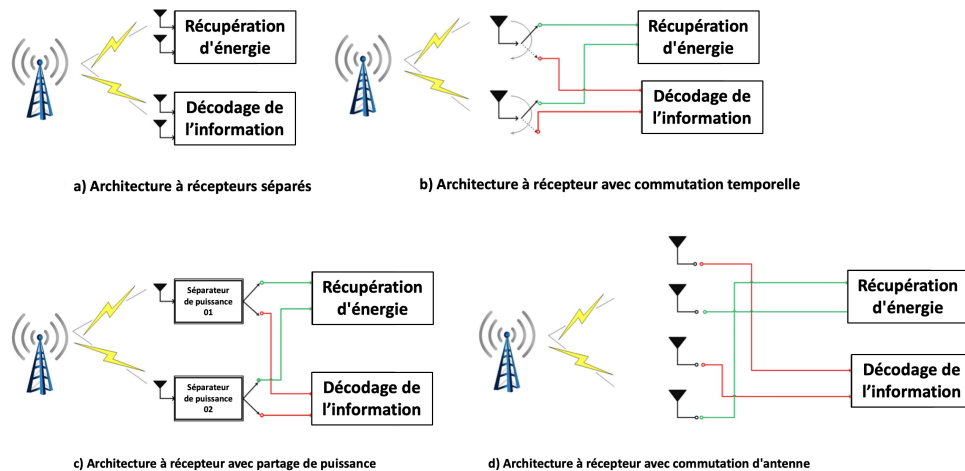


FIGURE 2.5 – conceptions d'architecture de récepteur intégré pour SWIPT

(Ponnimbaduge Perera *et al.*, 2018)

La technologie SWIPT peut être implémentée selon plusieurs architectures comme le montre la figure 2.5 :

1. Architecture à récepteurs séparés (Separate Receiver SR) : le décodage de l'information et la collecte de l'énergie se déroulent au niveau de récepteurs séparés.
2. Architecture à récepteur avec commutation temporelle (Time Switching Receiver TS) : sur la base d'un facteur de temps prédéfini, les antennes connectées s'attribuent un intervalle de temps pour collecter l'énergie et un intervalle pour décoder l'information.
3. Architecture à récepteur avec partage de puissance (Power Splitting Receiver PS) : le récepteur divise le signal reçu en deux flux de puissance sur la base d'un certain coefficient de partage.
4. Architecture à récepteur avec commutation d'antenne (Antenna Switching Receiver AS) : commutation d'antenne entre l'énergie de récupération et le décodage de l'information sur la base d'un algorithme d'optimisation.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les différents concepts utilisés dans le réseau étudié dans le cadre de ce mémoire, à savoir un réseau de capteurs assisté par UAV et SWIPT. Nous allons, dans le chapitre suivant, élaborer un état de l'art des différents travaux de la recherche liés à notre problématique.

CHAPITRE III

ÉTAT DE L'ART

Dans ce chapitre, nous présentons une revue de la littérature de recherche en relation avec notre problématique. Nous commençons par lister quelques travaux qui étudient les défis du déploiement et de la conception de la trajectoire des UAV. Ensuite, nous présentons les travaux liés à la problématique de la prolongation de la durée de vie des WSN ainsi que les défis de transfert de l'énergie dans ce type de réseau sans fil. Enfin, nous enchaînons par une présentation des travaux de recherche qui ont une relation directe avec notre problématique d'optimisation de la trajectoire de l'UAV dans les WSN.

3.1 Les défis de déploiement des UAV

La recherche sur le déploiement optimal des UAV est un domaine d'étude majeur, car il joue un rôle crucial dans la conception des systèmes assistés par UAV. L'objectif essentiel de ce déploiement est de garantir l'atteinte des objectifs visant à améliorer les performances globales des systèmes. Cependant, le placement 3D optimal des UAV représente un défi complexe en raison de multiples facteurs, tels que l'environnement de déploiement (par exemple, la zone géographique), les emplacements des équipements au sol et les caractéristiques du canal de communication entre l'UAV et le sol, qui sont influencées par la position de l'UAV (Mozaffari

et al., 2019). Pour les systèmes utilisant l'UAV comme station de base, il faut savoir qu'il est plus difficile de déployer une station de base aérienne qu'une station de base terrestre (Fotouhi *et al.*, 2019) car le positionnement de l'UAV dépend aussi de l'altitude (haute ou basse) (López-Pérez *et al.*, 2018). Nous constatons que les études effectuées diffèrent selon les objectifs, les variables et les contraintes de l'optimisation.

Les auteurs de (Al-Hourani *et al.*, 2014) ont déterminé l'altitude optimale d'un seul UAV pour un objectif d'atteindre une couverture maximale au sol. Dans ce travail, la couverture est exprimée en fonction de l'atténuation qui ne doit pas dépasser un seuil prédéfini (en anglais *Path Loss Maximum*, PLmax). Les auteurs proposent un modèle mathématique qui utilise des paramètres statistiques tels que le pourcentage de zone bâtie, le nombre de bâtiments par unité de surface et la distribution des hauteurs des bâtiments. De plus, (Al-Hourani *et al.*, 2014) montre que la couverture diminue pour les basses altitudes à cause de la diminution de la probabilité du LoS entre l'émetteur et les récepteurs. Par conséquent, pour obtenir une altitude optimale de l'UAV dans ce cas, il est nécessaire de prendre en compte l'impact de la distance et de la probabilité du LoS (Mozaffari *et al.*, 2019).

Dans (Mozaffari *et al.*, 2015), les auteurs ont travaillé sur la continuité du (Al-Hourani *et al.*, 2014) en formulant la problématique de déploiement de deux BS-UAV en prenant en charge les interférences. Les résultats montrent l'existence d'une distance de séparation optimale entre les UAV qui fournit une couverture maximale pour une zone cible donnée. En plus, la solution peut être étendue pour le cas de plusieurs BS-UAV.

Dans un contexte de déploiement de plusieurs UAV, minimiser le nombre de BS-UAV tout en déterminant le placement 3D de chaque UAV est l'objectif de (Kalan-tari *et al.*, 2016). Les auteurs ont pris en considération la densité des utilisateurs

dans la zone géographique étudiée. Leur méthode se base sur le changement de l'altitude des BS-UAV pour résoudre les problèmes de couverture et de capacité.

Dans le cadre de l'IoT, les auteurs de l'article (Mozaffari *et al.*, 2017) ont proposé une étude qui optimise conjointement le placement 3D et la mobilité des BS-UAV, offrant ainsi une contribution avancée par rapport aux travaux précédents. Cette approche permet aux BS-UAV de se déplacer efficacement pour desservir les appareils IoT avec une consommation d'énergie minimale. L'objectif principal de l'article est de minimiser la puissance de transmission des appareils IoT, en tenant compte des contraintes sur le rapport signal sur bruit plus interférences (en anglais *signal-to-interference-plus-noise ratio*, SINR). La solution proposée se décompose en deux étapes : la première consiste à optimiser le placement des BS-UAV et leur association avec les appareils IoT à l'aide d'une méthode itérative, tandis que la deuxième étape analyse le réseau IoT sur une période de temps où les appareils actifs varient, permettant ainsi une optimisation de la mobilité des UAV en mettant à jour dynamiquement leurs emplacements en fonction du processus d'activation des appareils.

Les auteurs de (Chen *et al.*, 2022) ont développé une solution de déploiement multi-UAV dans le contexte de l'IoT. Cette solution vise à couvrir l'ensemble des dispositifs IoT massifs tout en maximisant le débit moyen des UAV. Ce débit est défini comme le rapport entre la somme des débits de données de tous les UAV et le nombre total d'UAV. L'article propose ainsi plusieurs stratégies d'allocation de puissance et de placement d'UAV. La solution proposée repose sur trois composantes essentielles. Tout d'abord, les auteurs ont conçu un algorithme d'allocation de puissance qui respecte la demande de QoS de chaque dispositif IoT. Ensuite, les auteurs ont présenté un deuxième algorithme visant à optimiser le placement individuel d'un UAV pour maximiser le débit de données. Enfin, en combinant les deux algorithmes, les auteurs ont proposé une solution conjointe permettant de

couvrir un grand nombre de dispositifs en déployant plusieurs UAV de manière à maximiser le débit moyen des UAV.

L'article (Nouri *et al.*, 2022) étudie la problématique liée à un réseau infonuagique assisté par UAV, où plusieurs BS-UAV sont déployées pour desservir un ensemble de dispositifs IoT terrestres. L'objectif principal de cette étude est de maximiser l'efficacité énergétique en utilisant le minimum d'UAV, tout en réduisant les coûts et en respectant certaines contraintes de QoS. Pour résoudre ce problème difficile, les auteurs ont adopté une approche de décomposition, divisant le problème d'optimisation initial en trois sous-problèmes distincts : (1) les associations UAV-utilisateurs, (2) l'optimisation des altitudes, et (3) le positionnement 2D des UAV. Ensuite, ils ont utilisé des algorithmes à faible complexité pour résoudre chacun de ces sous-problèmes. Finalement, les solutions proposées sont combinées dans un algorithme qui atteint itérativement une solution approximative.

3.2 Les défis de la conception de la trajectoire des UAV

La conception de la trajectoire de l'UAV dans les systèmes de communication sans fil assisté par UAV constitue un autre défi d'une grande importance. En effet, la caractéristique de mobilité de l'UAV est une occasion avantageuse pour améliorer les systèmes de communication, mais elle fait face à diverses contraintes techniques. En particulier, la trajectoire d'un UAV est considérablement affectée par différents facteurs tels que la limitation du temps de vol, les contraintes énergétiques, la variation des canaux de communication avec les équipements au sol dû à la mobilité (Mozaffari *et al.*, 2019). Malheureusement, trouver une trajectoire optimale pour les UAV est une tâche difficile en général (Zeng *et al.*, 2016b). Cette difficulté réside, d'une part, dans l'obligation d'optimiser la trajectoire conjointement à une ou plusieurs contraintes de la QoS. D'autre part, l'optimisation de la

trajectoire est connue comme un problème analytique complexe et difficile à résoudre. Par conséquent, ce défi de la trajectoire optimale des UAV est bien présent dans plusieurs travaux de recherche depuis des années et les chercheurs continuent à l'étudier avec la progression des réseaux sans fil.

Les auteurs de (Zeng *et al.*, 2016a) ont étudié un système de communication classique composé de deux nœuds, source et destination, en déployant un UAV qui joue le rôle d'un relais mobile entre les deux. L'objectif est de maximiser le débit en optimisant conjointement la trajectoire de l'UAV ainsi que les puissances de transmission de la source et du relais. Un algorithme itératif est proposé pour optimiser conjointement l'allocation de puissance et la trajectoire du relais de manière alternée.

Dans (Wang *et al.*, 2018), les auteurs ont considéré un UAV agissant comme un point d'accès mobile pour certains nœuds sans fil. Ils ont étudié l'optimisation de la puissance de transmission et de la trajectoire de l'UAV. Leur objectif est de maximiser le débit moyen minimal, sous les contraintes de la trajectoire et de la puissance. Un algorithme itératif est proposé pour optimiser conjointement la puissance et la trajectoire de l'UAV de manière alternée.

Dans (Wu *et al.*, 2018), les auteurs ont étudié un système de communication sans fil multi-UAV, où plusieurs UAV sont déployés pour desservir un groupe d'utilisateurs au sol afin d'obtenir des communications plus efficaces. En se concentrant sur la transmission en liaison descendante, c'est à dire des UAV vers les utilisateurs au sol, les auteurs ont optimisé conjointement l'ordonnancement et l'association des communications des utilisateurs, ainsi que la trajectoire de l'UAV et le contrôle de la puissance de transmission dans l'objectif de maximiser le débit moyen minimal des utilisateurs au sol.

Les auteurs de (Di Franco et Buttazzo, 2015) ont introduit l'optimisation de la tra-

jectoire d'un UAV pour la détection photogrammétrique d'une zone géographique. La contribution principale de l'article est la conception d'un algorithme d'optimisation de la trajectoire qui minimise la consommation d'énergie tout en satisfaisant un ensemble d'autres contraintes, telles que la couverture de la zone géographique et la résolution des images captées. Cet article propose une méthode pour dériver un modèle énergétique spécifique à un UAV à partir de mesures réelles. L'algorithme calcule ensuite la vitesse optimale pour minimiser la consommation énergétique sur une distance donnée. Une fois la trajectoire complète générée, une vérification de faisabilité est effectuée pour s'assurer que l'énergie disponible sur l'UAV est suffisante pour couvrir toute la zone.

La collecte de données assistée par UAV pour recueillir des données auprès d'un certain nombre d'utilisateurs au sol est une solution prometteuse dans les réseaux sans fil. Mais dans les cas d'utilisation d'urgence, le temps d'exécution de la mission de l'UAV devrait être une préoccupation majeure. Dans l'article (Li *et al.*, 2020), les auteurs ont réalisé une conception pour minimiser le temps total de la mission de l'UAV en optimisant la trajectoire, l'altitude, la vitesse et la planification de la collecte de données par l'UAV. Afin de résoudre ce problème, deux algorithmes d'optimisation de la trajectoire sont proposés : l'algorithme basé sur des segments et l'algorithme basé sur des groupes pour les déploiements massifs à haute densité des utilisateurs. Ensuite, l'optimisation de la vitesse et de la planification des liens est modélisée sous forme d'un problème de programmation non linéaire à variables mixtes (MINLP), et une méthode de descente de coordonnées en bloc est utilisée pour sa résolution.

Toujours dans la gestion des situations d'urgence, les auteurs de (Zhao *et al.*, 2019) ont considéré un réseau assisté par UAV déployé en cas de catastrophe. L'objectif est de maintenir la performance du réseau en utilisant un UAV tout en coopérant avec les BSs terrestres non affectées par la catastrophe. Afin d'éviter

les interférences qui peuvent être causées par cette coopération, les auteurs ont proposé une optimisation conjointe de la trajectoire de l’UAV et de la planification des communications avec l’UAV. Grâce à une optimisation conjointe, le débit moyen des appareils desservis par l’UAV peut être maximisé en gardant la même QoS des appareils desservis par les BSs.

L’article (Hua *et al.*, 2020) propose un réseau de transmission simultané en liaison montante et descendante assisté par deux types d’UAV. D’un côté, un UAV agissant en tant que station de base, UAV-BS, et qui collecte des données à partir de multiples capteurs au sol. De l’autre côté, un UAV fonctionne comme un point d’accès UAV-AP et qui transmet des données aux capteurs au sol. L’objectif de cet article est de maximiser le débit du système en optimisant conjointement la trajectoire 3D des UAV, l’ordonnancement des communications et la puissance de transmission des UAV-AP et celle des capteurs. Dans un premier temps, les auteurs ont développé une solution globalement optimale en utilisant la méthode d’approximation externe par polybloc. Ensuite, pour le cas plus général qui inclut l’optimisation de la trajectoire UAV en 3D, un algorithme itératif est proposé pour optimiser de manière alternative les sous-problèmes en utilisant la technique d’approximation convexe successive.

Les auteurs de (Nguyen et Le, 2022) ont entrepris une étude portant sur un réseau sans fil assisté par plusieurs UAV, mettant en œuvre l’accès multiple non orthogonal (NOMA). L’objectif principal de cette étude est de minimiser la consommation d’énergie totale des utilisateurs au sol tout en optimisant simultanément les trajectoires des UAV, l’allocation de la puissance de transmission des utilisateurs, l’association entre les utilisateurs et les UAV, ainsi que l’appariement des utilisateurs NOMA. L’article présente un algorithme utilisant l’approche de descente de coordonnées par blocs. L’étude met également en évidence le compromis entre la durée de vol des UAV et la consommation d’énergie totale, tout en explorant

l'impact de paramètres tels que le nombre d'utilisateurs et d'UAV sur la consommation d'énergie.

L'article (Chen *et al.*, 2023) se concentre sur la résolution du problème de planification de trajectoire des UAV dans un contexte maritime, où les utilisateurs à bord des navires transmettent des données aux stations de base terrestres via un relais UAV. L'objectif est de minimiser la consommation d'énergie de l'UAV tout en optimisant sa trajectoire et en garantissant la transmission des données pour chaque utilisateur. Les auteurs proposent un algorithme basé sur la technique d'approximation convexe successive pour optimiser conjointement la trajectoire de l'UAV et la planification des transmissions des utilisateurs.

3.3 Durée de vie dans les WSN

Dans les WSN, la consommation de l'énergie est généralement divisée en trois catégories : la détection, le traitement des données et la communication (Gungor et Hancke, 2009). Malheureusement, les capacités techniques des capteurs, notamment la batterie, la capacité de stockage et le débit de transmission des données, restent faibles et insuffisantes pour assurer une longue durée de vie du réseau (Ali *et al.*, 2022).

Selon (Pantazis *et al.*, 2013), il n'existe pas une définition universelle de la durée de vie d'un réseau de capteurs. Le terme durée de vie du réseau correspond dans un certain cas au moment où le premier nœud épuise son énergie, ou quand un certain nombre des nœuds du réseau sont hors service, ou même lorsque tous les nœuds sont morts. Par contre, l'objectif d'un réseau de capteurs est de rester opérationnel et d'accomplir ses tâches tout au long de son utilisation. Donc il est important de maximiser la durée de vie du réseau, ce qui signifie augmenter la capacité de survie du réseau ou prolonger la durée de vie de la batterie des nœuds

(Pantazis *et al.*, 2013).

3.3.1 Formation de clusters

Dans la majorité des cas, les capteurs sont localisés dans des endroits lointains et difficiles d'accès, ce qui complique l'alimentation fréquente de leurs batteries. Dans ce sens, plusieurs recherches ont été menées afin d'optimiser la consommation de l'énergie dans un réseau WSN en se basant sur la solution de formation de clusters.

En général, dans cette solution, les capteurs sont regroupés pour former des groupes, appelés clusters. Dans chaque cluster, un capteur est sélectionné pour agir comme *Cluster Head* - CH. Il est considéré comme un point de relais pour les capteurs de son groupe. Particulièrement, le CH est conçu pour avoir une source d'alimentation supérieure, avoir des modules et des interfaces de communication supplémentaires, et être considéré parfois comme un nœud d'alimentation (Khalifeh *et al.*, 2020). Le CH collecte les données détectées à partir des capteurs de son groupe, puis il les traite pour décider par la suite s'ils doivent être envoyés au nœud récepteur distant pour un traitement et une analyse ultérieurs. En plus, le nœud CH peut compresser les paquets à envoyer au nœud récepteur pour une optimisation supplémentaire de la puissance (Khalifeh *et al.*, 2020)

Les auteurs de (Mazumdar *et al.*, 2018) ont présenté une étude comparative des différents algorithmes de formation de clusters utilisés afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la durée de vie des WSN. Parmi ces algorithmes, on retrouve LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), un protocole très populaire dans le domaine de la recherche sur le *clustering* des WSN, il a été présenté pour la première fois dans l'article (Heinzelman *et al.*, 2000). Dans ce protocole, tous les CH transmettent leurs données collectées directement au nœud récepteur.

Dans l'article (Chniguir et Ben Jemaa, 2022), les auteurs ont supposé que la

durée de vie du WSN est déterminée par de la durée de vie du premier nœud hors service. La solution proposée est basée sur K-means et elle considère la distance et l'énergie comme paramètres utilisés dans la maximisation de la durée de vie du premier nœud hors service.

L'article (Ghaffari, 2014) propose un protocole de routage pour améliorer l'efficacité énergétique appelé EERP (en anglais *energy-efficient routing protocol*) qui se base sur l'algorithme A^* . Cette solution vise à prolonger la durée de vie du réseau en acheminant les paquets de données via le chemin optimal le plus court. L'algorithme proposé prend en compte plusieurs caractéristiques des nœuds, notamment leur énergie résiduelle, la qualité de la liaison, la mémoire libre et le nombre minimum de sauts, afin de sélectionner le chemin optimal. La prise en compte des paramètres mentionnés ci-dessus peut améliorer la durée de vie des WSN grâce à une consommation d'énergie efficace et équilibrée. En privilégiant les nœuds avec une énergie résiduelle élevée, la charge de trafic peut être répartie et, par conséquent, la durée de vie du réseau prolongée.

Dans (Potthuri *et al.*, 2018), les auteurs ont soulevé un défaut de formation de clusters. Lors de la construction des clusters, si les capteurs ne sont pas correctement affectés aux CH, cela entraîne une surcharge des CH et leur défaillance prématurée. Cela a pour conséquence d'augmenter la latence et de diminuer les performances du réseau. Afin de résoudre cette problématique, les auteurs de l'article ont proposé un algorithme, appelé DESA qui combine deux métaheuristiques, à savoir l'évolution différentielle et le recuit simulé et qui a pour objectif de maximiser la durée de vie du réseau du WSN en optimisant le choix des CH.

En revanche, dans l'étude (Masoud *et al.*, 2019), les auteurs se sont interrogés si la formation de clusters est une solution viable dans tous les cas. Ils ont proposé une solution hybride appelée HCP (*Hybrid Clustering Routing Protocol*) qui se

compose de deux phases : formation de clusters et transfert de données. Dans la première phase, la sélection des CH se fait par une variation de LEACH. Par la suite, les capteurs rejoignent les CH en fonction de la distance. Cependant, dans cette phase, les nœuds décident d'envoyer les données au CH ou directement au nœud récepteur en fonction d'un seuil.

3.3.2 Récupération d'énergie

En plus de la technique de formation de clusters, l'intégration de la technique de la récupération de l'énergie (en anglais *Energy Harvesting* EH) est une solution complémentaire afin de prolonger la durée de vie des WSN. La récupération d'énergie peut être décrite comme un mécanisme utilisé pour générer de l'énergie à partir de l'environnement ambiant afin de fournir une alimentation électrique ininterrompue pour un capteur en particulier ou pour l'ensemble du WSN (Shaikh et Zeadally, 2016).

Les auteurs de l'article (Chaudhary et Peddoju, 2021) ont combiné le EH avec la formation de clusters et ils ont constaté qu'il y a une amélioration significative de la durée de vie des nœuds sur la période de simulation. Les résultats montrent qu'en combinant ces deux techniques, ils peuvent effectivement prolonger la durée de vie du réseau de 21% en moyenne pour tous les algorithmes de formation de clusters.

Dans (Sah *et al.*, 2023), les auteurs présentent une stratégie de planification nommée ERAS (*Efficient Routing Awareness-based Scheduling*), qui utilise un protocole de routage basé sur la formation de clusters et la récupération d'énergie pour améliorer la durée de vie des capteurs, et par conséquent, celle du WSN. La méthode ERAS, organisée en phases, sélectionne le CH en fonction de l'énergie résiduelle et du taux de récupération d'énergie. Elle applique ensuite une pla-

nification synchronisée basée sur TDMA (*Time Division Multiple Access*) pour optimiser l'utilisation de l'énergie entre les clusters. Les résultats de simulations démontrent une prolongation significative de la durée de vie du réseau par rapport à d'autres approches.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons explorer comment l'intégration des UAV peut constituer une solution prometteuse pour prolonger la durée de vie des WSN.

3.4 Intégration de SWIPT dans les WSN

Toujours dans le but d'assurer l'efficacité énergétique et de prolonger la durée de vie des WSN, il a été primordial de s'intéresser aux technologies de transfert d'énergie. Comme expliqué dans la section 2.3, la technologie SWIPT peut engendrer des gains notables en termes de consommation d'énergie, d'efficacité spectrale, de gestion d'interférences et du délai de transmission en permettant la transmission simultanée de la puissance et de l'information (Ponnimbaduge Perera *et al.*, 2018).

L'intégration de SWIPT dans les WSN est considérée dans l'étude (Guo *et al.*, 2015). Les auteurs ont proposé un réseau WSN composé de plusieurs clusters de capteurs où chacun possède un CH et un relais. Dans ce scénario, l'activation de SWIPT se fait au niveau du CH de chaque *cluster* qui transmet simultanément de l'information et de l'énergie au relais. L'avantage de ce système réside dans deux aspects : (i) le réseau peut profiter de la transmission coopérative en utilisant des capteurs intermédiaires comme relais en économisant considérablement l'énergie ; (ii) les relais peuvent être alimentés par l'énergie récupérée en compensant l'énergie consommée lors du transfert de données aux stations de base. L'objectif de ce travail est de maximiser l'efficacité énergétique du système en optimisant, d'une part, la puissance de transmission et la sélection de relais, et d'autre part, le

coefficient de partage de puissance SWIPT pour la récupération d'énergie et le décodage des informations (Guo *et al.*, 2015). Le problème d'optimisation non convexe de cet article est résolu par un algorithme itératif qui combine la programmation fractionnaire non linéaire et la décomposition duale en utilisant des transformations appropriées de la fonction objectif et des variables d'optimisation.

Les auteurs de l'article (Guo *et al.*, 2018) ont appliqué la technique SWIPT à un WSN mobile composé d'un ensemble de nœuds de capteurs et d'un collecteur mobile. Comme l'article précédant (Guo *et al.*, 2015), l'énergie récoltée par les relais peut compenser leur consommation d'énergie lors de la transmission des données. L'objectif est de maximiser l'efficacité énergétique du système en optimisant l'allocation des ressources, le coefficient de partage de puissance SWIPT et le débit de transmission des données.

En plus de son efficacité énergétique, l'intégration de SWIPT dans les réseaux de capteurs peut garantir des communications vertes (Lu *et al.*, 2021). En effet, le déploiement des technologies de communication sans fil a augmenté la consommation d'énergie dans les réseaux sans fil avec une empreinte carbone atteignant des taux alarmants (Gandotra *et al.*, 2017). Une architecture basée sur un réseau de capteurs utilisant SWIPT dans le cadre de l'agriculture intelligente est proposée dans (Lu *et al.*, 2021). Les WSN fournissent à l'agriculture intelligente des solutions efficaces pour la collecte, la transmission et le traitement d'information. Cependant, le grand nombre de capteurs utilisés consomment trop d'énergie, ce qui impacte le principe de la communication verte. L'article propose une solution d'optimisation qui permet de maximiser à la fois l'efficacité énergétique du système et l'utilisation de ressources d'énergie renouvelable. Ainsi, l'intégration de SWIPT dans les réseaux de capteurs permet de combiner efficacité énergétique et communication verte dans le domaine de l'agriculture intelligente.

Les auteurs de (Choi *et al.*, 2020) ont considéré l'intégration de SWIPT dans un WSN à consommation énergétique neutre. Dans ce réseau, les capteurs ont la capacité de récupérer l'énergie de l'environnement et la transformer en énergie électrique, ce que les auteurs ont appelé *energy-neutral operation* - ENO. Grâce à l'énergie récoltée, les capteurs transmettent simultanément leurs données et de l'énergie aux CH qui souffrent d'une faible autonomie énergétique. L'objectif est de maximiser le débit des données tout en garantissant l'ENO au niveau des capteurs. Les auteurs ont proposé par la suite un nouveau cadre ENO, qui fournit une structure de trame pour le fonctionnement de SWIPT, une amélioration du fonctionnement de l'ENO, une optimisation du coefficient de partage SWIPT, ainsi qu'un algorithme de *clustering* et de sélection des CH.

Dans leur article (Gao *et al.*, 2022), les auteurs ont proposé une collaboration entre SWIPT et l'énergie solaire pour maximiser l'efficacité énergétique d'un WSN. Pour ce faire, ils ont donné aux CH du réseau la tâche de la collecte de l'énergie solaire et la diffusion périodique de l'énergie aux capteurs en mode full-duplex. Chaque nœud consomme l'énergie rechargée pour la détection et la transmission des données. Afin de maximiser l'efficacité énergétique du réseau, les auteurs ont formulé un problème d'optimisation qui optimise conjointement le déploiement des CH solaires, la puissance de diffusion d'énergie et la taille des données collectées sous la contrainte énergétique de la demande du réseau.

3.5 Optimisation de la trajectoire des UAV dans les WSN

Avec l'omniprésence des WSN dans beaucoup de domaines de la vie quotidienne, les recherches continuent à améliorer les performances de ses systèmes. Ainsi, la problématique de prolonger la durée de vie des WSN, en combinant les technologies des UAV et du transfert d'énergie, a fait l'objet de nombreux travaux de

recherche.

Une des solutions existantes pour minimiser la consommation de l'énergie des capteurs est la maximisation des périodes de sommeil dans le but de minimiser la consommation d'énergie. Les auteurs de (Zhan *et al.*, 2018) ont optimisé conjointement la planification de l'état des capteurs à visiter et la trajectoire de l'UAV afin de minimiser la consommation d'énergie des capteurs. Ils ont considéré un modèle de canal à évanouissement pour les liaisons entre les capteurs et l'UAV. Certes, les résultats de l'étude prouvent l'efficacité de la solution, mais le problème de l'autonomie de l'UAV n'a pas été pris en compte.

L'article (Baek *et al.*, 2020a) étudie l'optimisation de la trajectoire de l'UAV dans un WSN, où l'UAV adopte un mode de vol stationnaire pour collecter les données des capteurs. L'objectif est de maximiser l'énergie résiduelle minimale des capteurs après la transmission des données afin de prolonger la durée de vie du réseau. Les auteurs ont proposé un algorithme sous-optimal pour atteindre cet objectif. Finalement, ils ont prouvé que la trajectoire UAV proposée peut réduire la consommation d'énergie de nombreux capteurs, ce qui permet une collecte de données économe en énergie, et augmente considérablement la durée de vie du réseau. Cependant, les travaux ci-dessus ont considéré seulement la consommation d'énergie des capteurs et ils n'ont pas pris en compte la contrainte d'autonomie de l'UAV, qui est l'un des facteurs importants pour déterminer les performances des systèmes de communication assistés par UAV (Wang *et al.*, 2022).

Contrairement à ce qui précède, les auteurs de (Baek *et al.*, 2020b) ont considéré la contrainte sur l'énergie maximale de l'UAV. Dans cette étude, les auteurs ont étudié un réseau de capteurs rechargeables sans fil (WRSN) assisté par un UAV qui a pour rôle de collecter les données des capteurs et de fournir de l'énergie aux capteurs en utilisant SWIPT. La problématique étudiée est de prolonger la durée

de vie du réseau de capteurs en maximisant l'énergie minimale des capteurs après la transmission des données et la récupération d'énergie sous des contraintes liées à l'UAV. L'objectif des auteurs est atteint en optimisant conjointement les emplacements et la durée de vol stationnaire de l'UAV. La solution proposée commence par une optimisation de la durée de vol stationnaire de l'UAV pour des emplacements fixes de l'UAV par la méthode du multiplicateur de Lagrange. Ensuite, ils ont conçu un algorithme pour trouver des trajectoires initiales réalisables. Enfin, une trajectoire quasi optimale est dérivée en ajustant la trajectoire de l'UAV de manière itérative, où les emplacements et la durée de vol stationnaire sont mis à jour à chaque itération.

Dans un autre travail similaire, les auteurs de (Huang *et al.*, 2019) ont étudié l'optimisation conjointe de la puissance de transmission de l'UAV pour une communication descendante et de la trajectoire de l'UAV qui utilise la technologie SWIPT. L'objectif est de maximiser l'énergie minimale récoltée parmi tous les nœuds au sol, sous réserve d'une contrainte de débit de données moyen minimal sur chaque nœud et d'une puissance de transmission maximale de l'UAV. Les auteurs ont divisé le problème en deux sous-problèmes puis ils ont proposé un algorithme itératif.

Dans le contexte de l'optimisation de l'efficacité énergétique visant à prolonger la durée de vie d'un WSN, les auteurs de (Zhu *et al.*, 2021) ont concentré leurs efforts sur une solution reposant sur l'apprentissage par renforcement profond. Ils ont étudié un WSN assisté par UAV, où les CH reçoivent des données de leurs nœuds membres, tandis qu'un UAV est chargé de collecter des données auprès des CH. L'objectif principal est de minimiser la consommation totale d'énergie du système UAV-WSN lors d'un cycle complet de collecte de données. À cette fin, les auteurs ont proposé une nouvelle technique d'apprentissage par renforcement profond (en anglais *Deep Reinforcement Learning*, DRL) appelée réseau de pointeurs-A* (Ptr-

A*), qui peut efficacement apprendre la politique de trajectoire de l'UAV. Cette approche s'est avérée efficace. Cependant, il convient de noter qu'une extension de cette étude serait nécessaire pour prendre en compte les aspects liés à la recharge des capteurs et de l'UAV.

Les travaux précédemment cités se sont tous focalisés sur l'utilisation d'un unique UAV au sein d'un WSN, ce choix présentant des avantages notables en termes de simplicité et de coût. Toutefois, une question légitime se pose : pourquoi n'a-t-on pas opté pour l'utilisation de plusieurs UAV ? Il est à souligner que l'intégration de plusieurs UAV pourrait potentiellement prolonger davantage la durée de vie du réseau, mais cela s'accompagnerait d'un coût de déploiement plus élevé.

Pour atteindre l'objectif de minimiser le temps de la mission de la collecte des données des capteurs dans un WSN, les articles (Zhan et Zeng, 2019) et (Wang *et al.*, 2020) proposent un système assisté par plusieurs UAV. Le déploiement de plusieurs UAV au lieu d'un seul est une solution courante dans la recherche afin de prolonger la durée de vie du WSN. L'objectif des deux travaux est le même, soit la minimisation du temps total des trajectoires de tous les UAV pour assurer la collecte des données de tous les capteurs. Dans (Wang *et al.*, 2020), les auteurs ont résolu le problème par une optimisation conjointe de l'association UAV-capteurs et la trajectoire des UAV. Dans (Zhan et Zeng, 2019), les auteurs ont proposé une optimisation conjointe de la trajectoire des UAV, la planification de l'état de fonctionnement des capteurs, et l'association UAV-capteurs. La solution proposée consistait à définir les positions en vol stationnaire des UAV, suivi par la résolution d'une variante du problème du voyageur de commerce (en anglais *Traveling Salesman Problem*, TSP) pour optimiser la trajectoire et enfin une solution générale où l'UAV peut collecter les données en mode de vol continu. Cependant, aucun des travaux n'a considéré la contrainte sur l'énergie des UAV et le besoin de recharger leurs batteries.

Dans le même contexte, l'article (Benmad *et al.*, 2022) aborde le problème de la collecte de données dans un WSN assisté par plusieurs UAV. L'objectif principal est de minimiser le temps total de service en optimisant conjointement leurs trajectoires tout en desservant tous les capteurs du réseau. Étant donné que les UAV considérés sont hétérogènes, avec des durées de vie de batterie différentes, le problème devient encore plus complexe. En plus de la solution optimale très complexe, l'article propose deux heuristiques pour résoudre efficacement le compromis entre performance et complexité. Les résultats de la simulation montrent que l'un des algorithmes converge davantage vers la solution optimale.

Pour la mise à jour des informations d'état en temps réel, il est important de garantir la fraîcheur des données reçues des capteurs. L'âge de l'information (en anglais *Age of Information*, AoI) est une métrique de performance importante très étudiée récemment dans le domaine de l'IoT et des WSN. AoI représente le temps écoulé depuis la génération, ou la dernière mise à jour, d'une donnée jusqu'à sa réception effective par le destinataire. L'article (Hu *et al.*, 2021) étudie un système IoT assisté par UAV, où ce dernier décolle d'un centre de données, vole vers chacun des capteurs au sol pour transférer de l'énergie et collecte les données des capteurs, puis retourne au centre de données. L'objectif est de minimiser l'AoI moyen des données collectées à partir de tous les capteurs au sol en optimisant conjointement la trajectoire de l'UAV, le temps requis pour charger chaque capteur et le temps requis pour la collecte de données. Un cadre de solution est présenté, où le problème principal est d'abord décomposé en deux sous-problèmes : (i) un problème d'allocation de temps de transfert d'énergie et de collecte de données et (ii) un problème de planification de la trajectoire de l'UAV. Le premier sous-problème, étant convexe, est résolu en utilisant les conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Le deuxième sous-problème, basé sur la solution optimale obtenue au premier sous-problème, est résolu par deux algorithmes différents. En

particulier, un algorithme basé sur la programmation dynamique est conçu pour trouver la solution optimale globale en vérifiant toutes les solutions candidates. Les auteurs ont démontré la performance de leur système, mais la problématique de l'autonomie de l'UAV et la recharge de sa batterie n'a pas été abordée.

3.6 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art des travaux de recherche liés à notre problématique, qui vise à prolonger la durée de vie d'un WSN assisté par un UAV en optimisant sa trajectoire et en intégrant la technologie SWIPT. Nous avons examiné différentes approches, allant des méthodes mathématiques aux variations du problème du voyageur de commerce en passant par les techniques d'apprentissage par renforcement profond, qui ont été utilisées pour optimiser la trajectoire de l'UAV.

Cependant, au cours de notre étude, nous avons relevé une lacune commune dans ces travaux : ils se concentrent principalement sur l'optimisation de la trajectoire de l'UAV et de son placement, sans aborder de manière significative la problématique de sa contrainte énergétique.

C'est pourquoi notre sujet de mémoire propose de combler cette lacune en développant un système modèle qui met en évidence cette problématique. Notre approche consistera à intégrer un mécanisme de recharge de l'UAV au sein du système de WSN, permettant ainsi de relever le défi de la limitation de l'énergie et de prolonger efficacement la durée de vie du réseau.

3.7 Conclusion

Pour conclure, après avoir élaboré un état de l'art des travaux de recherche liés à notre problématique, l'objectif du chapitre suivant est de présenter notre contribution. Cette contribution consiste à proposer une solution complète qui optimise non seulement la trajectoire de l'UAV, mais intègre également une stratégie de recharge. Cette approche vise à améliorer l'efficacité énergétique et à prolonger la durée de vie du réseau WSN assisté par UAV.

CHAPITRE IV

CALCUL DE LA TRAJECTOIRE DES UAV ET PLACEMENT DES DÉPÔTS DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS

Ce chapitre commence par une modélisation du système étudié en décrivant son fonctionnement ainsi que les modèles de communication et de gestion d'énergie adoptés. Ensuite, nous formulons mathématiquement le problème sous la forme d'un problème d'optimisation dont l'objectif est de minimiser le temps de la mission de l'UAV tout en optimisant sa trajectoire et le placement des dépôts de recharge et de collecte de données. Enfin, le chapitre présente un algorithme heuristique qui se base sur l'approche gloutonne du plus proche voisin ainsi qu'une solution optimale qui se base sur l'utilisation d'un solveur tel que CPLEX.

4.1 Modèle du système

Nous considérons un WSN composé d'un ensemble de capteurs (en anglais *Sensor nodes*, SN) homogènes et capables de recevoir de l'énergie sans fil pour se recharger. Les capteurs sont distribués au sol dans une zone géographique, et dans cette modélisation, nous posons l'hypothèse que tous les capteurs sont situés sur le même plan. L'ensemble des capteurs est dénoté $\mathcal{S} = \{s_n | n = 1, 2, \dots, N\}$, avec $N \in \mathbb{N}$ le nombre total des capteurs. Chaque SN s_n est identifié par sa position $\mathbf{w}_n \in \mathbb{R}^2$ qui définit ses coordonnées cartésiennes (x_n, y_n) .

Dans ce système, un UAV est déployé pour effectuer deux tâches : (i) collecter les données captées par les SN et (ii) recharger les batteries des SN. Cependant, en raison de la capacité limitée de sa batterie, l’UAV aura besoin de se recharger fréquemment. Dans ce contexte, nous allons déployer un ensemble de points de recharge et de collecte de données, que nous appellerons des dépôts. Pour qu’un dépôt puisse être mis en place, il doit disposer d’alimentation électrique et d’une connectivité au réseau lui permettant d’assurer ses opérations de communication avec l’UAV.

Étant donné que le déploiement de nouvelles infrastructures est coûteux, les auteurs (Vitello *et al.*, 2019) et (Gedeon *et al.*, 2018) ont proposé de tirer parti des infrastructures existantes présentes dans les villes afin de déployer des centres de données dans le cadre de l’informatique de périphérie. Plus précisément, ils ont suggéré de mettre à niveau les stations de base cellulaires, les routeurs et les lampadaires pour accueillir des cloudlets ou des centres de données de périphérie.

Dans la même optique, nous supposons que des sites d’infrastructure réseau existants ont déjà été déployés à des emplacements fixes dans la zone géographique de notre système. Ces sites offrent un accès à une connexion réseau fiable et un espace physique à proximité pour accueillir du matériel supplémentaire. Ainsi, le choix de positionner les dépôts au sein de ces sites en vue de réutiliser leur fiabilité infrastructurelle s’avère plus rentable que de créer de nouveaux sites pour les dépôts.

Soit $\mathcal{B} = \{b_l | l = 1, 2, \dots, L\}$ l’ensemble des sites, avec $L \in \mathbb{N}$ le nombre total des sites. Chaque site b_l est identifié aussi par sa position \mathbf{w}_l qui définit ses coordonnées (x'_l, y'_l) . L’ensemble des dépôts est dénoté $\mathcal{C} = \{c_m | m = 1, 2, \dots, M\}$, avec $M \in \mathbb{N}$ le nombre total des dépôts placés. Les dépôts seront déployés au niveau d’un sous-ensemble des sites \mathcal{B} .

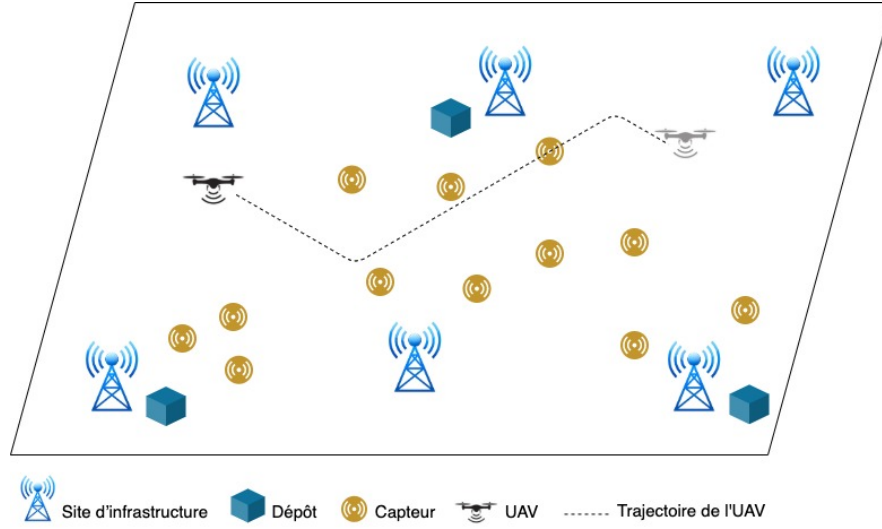


FIGURE 4.1 – modèle du système

Définissons la variable ε_l qui indique si le site $b_l \in \mathcal{B}$ est utilisé pour déployer un dépôt comme suit :

$$\varepsilon_l = \begin{cases} 1 & \text{si un dépôt est déployé dans le site } b_l, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (1)$$

Notations	Description
\mathcal{B}/L	Ensemble/nombre de sites
\mathcal{C}/M	Ensemble/nombre de dépôts
\mathcal{S}/N	Ensemble/nombre de capteurs
\mathcal{R}/R	Ensemble/nombre de sous-trajectoires
H	Altitude de l'UAV
v_{max}	Vitesse maximale de l'UAV
$d(i, j)$	Distance entre deux nœuds (SN et/ou dépôt) i et j
β_i^r	Indicateur si le nœud i est visité dans la sous-trajectoire r
α_{ij}^r	Indicateur si l'UAV est passé de i à j dans la sous-trajectoire r

D^r	Distance parcourue par l'UAV pendant une sous-trajectoire r
D	Distance parcourue durant la mission de l'UAV
T^r	Durée d'une sous-trajectoire r
T	Temps de la mission de l'UAV du dépôt initial au dépôt final
t_{ij}^f	Temps de vol de l'UAV du nœud i au nœud j
t_m^h	Temps d'arrêt de l'UAV au dépôt c_m
t_n	Temps de service de l'UAV pour le SN s_n
σ	Coefficient de partage de temps SWIPT
E_n^H	Énergie récupérée par le SN s_n
P_u	Puissance de transmission de l'UAV
$d(n, u)$	Distance horizontale entre l'UAV et le SN s_n
E_{ij}^f	Énergie consommée par l'UAV pendant le vol entre i et j
E^r	Énergie consommée par l'UAV sur une sous-trajectoire r
E_{max}	Autonomie maximale de l'UAV

TABLEAU 4.1 – tableau de notations

4.1.1 Modélisation de la trajectoire de l'UAV

La mission de l'UAV est de visiter tous les SN en procédant au chargement de leurs batteries et à la récupération des données qu'ils ont collectées. Durant sa mission, l'UAV a la possibilité de recharger sa propre batterie en visitant les dépôts. Nous supposons qu'une mission commence à partir d'un dépôt, peut contenir un sous-ensemble ordonné de SN et se termine à un dépôt. La trajectoire de l'UAV entre le dépôt initial et le dépôt final est divisée en un nombre $R \in \mathbb{N}$ de sous-trajectoires. Une sous-trajectoire est un sous-ensemble ordonné qui commence à partir d'un dépôt, peut contenir un sous-ensemble ordonné de SN et se termine à un dépôt.

Considérons l'ensemble des sous-trajectoires $\mathcal{R} = \{r | r = 1, 2, \dots, R\}$, avec $R \in \mathbb{N}$ le nombre total des sous-trajectoires.

Considérons le graphe complet $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A}, \mathbf{W})$, avec $\mathcal{V} = \mathcal{S} \cup \mathcal{C}$ l'ensemble des sommets du graphe formé par l'union de l'ensemble des dépôts et l'ensemble des SN. L'ensemble des arêtes est donné par $\mathcal{A} = \{(i, j) | i, j \in \mathcal{V}, i \neq j\}$. Les arêtes du graphe seront donc de trois types : (i) arête reliant deux SN, (ii) arête reliant un SN et un dépôt et (iii) arête reliant deux dépôts. Chaque arête possède un poids qui représente la distance horizontale entre deux sommets du graphe $d(i, j)$. En supposant que les distances entre les sommets sont connues, $\mathbf{W} = [d(i, j)]_{(i, j) \in \mathcal{A}}$ dénote la matrice des poids.

Soit $\mathbf{u} = (x_u, y_u)$ la position horizontale de l'UAV pendant son vol, et H son altitude supposée fixe pendant son vol. Soit T le temps nécessaire à l'UAV pour parcourir tous les SN qui inclut le temps de transfert d'énergie et de la collecte des données ainsi que le temps de ses arrêts aux dépôts pendant la mission. On dénote par $d(t)$ la distance parcourue par l'UAV jusqu'à l'instant t , avec $0 \leq t \leq T$.

Nous définissons les variables β_i^r qui permettent d'indiquer si un sommet $i \in \mathcal{V}$ est visité ou non pendant la sous-trajectoire r . Donc nous avons :

$$\beta_i^r = \begin{cases} 1 & \text{si le sommet } i \text{ est visité durant la sous-trajectoire } r, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2)$$

Nous définissons les variables α_{ij}^r qui permettent d'indiquer si l'UAV a parcouru l'arête (i, j) ou non pendant la sous-trajectoire r . Donc nous avons :

$$\alpha_{ij}^r = \begin{cases} 1 & \text{si l'UAV est passé de } i \text{ à } j \text{ durant la sous-trajectoire } r, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3)$$

Soit D^r la distance parcourue par l'UAV pendant une sous-trajectoire r . Nous

avons donc :

$$D^r = \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij}^r d(i,j), \forall r \in \mathcal{R}. \quad (4)$$

Par conséquent, la distance totale de la trajectoire parcourue par l'UAV pendant la mission est la somme des distances de toutes les sous-trajectoires :

$$D = \sum_{r \in \mathbb{N}} D^r. \quad (5)$$

4.1.2 Modèle de communication UAV - SN

Dans le modèle de réseau proposé, nous allons supposer que l'UAV exécute sa mission en mode vol continu. Il ne dessert pas les SN en se positionnant à une position fixe mais plutôt en parcourant une distance. Cette distance commence lorsque l'UAV se rapproche du SN et se termine après. Comme le montre la figure 4.2, l'UAV s'approche du SN présenté par le sommet $i \in \mathcal{V}$ et commence à le desservir à partir de la position x_i^c . L'UAV continue son vol avec une vitesse v_i jusqu'à la position y_i^c . Lorsque l'UAV arrive à la position y_i^c , il arrête de desservir le SN et continue son vol avec la vitesse v_{max} jusqu'au moment où il commence à desservir le SN suivant, présenté par le sommet $j \in \mathcal{V}$.

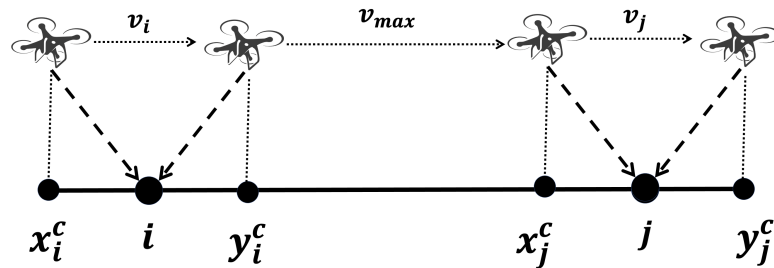


FIGURE 4.2 – mode de service de l'UAV entre deux SN

Pour ce mode, le temps de vol de l'UAV entre les deux sommets i et j peut être

représenté comme suit :

$$t_{ij}^f = \frac{d(i, j) - d(i, y_i^c) - d(x_j^c, j)}{v_{max}} + \frac{d(i, y_i^c)}{v_i} + \frac{d(x_j^c, j)}{v_j} \quad (6)$$

Nous calculons aussi le temps de vol entre un dépôt et un SN, comme le montre la figure 4.3. Considérons la variable binaire θ_i qui est égale à un si le sommet i est un SN et zéro si le sommet est un dépôt.

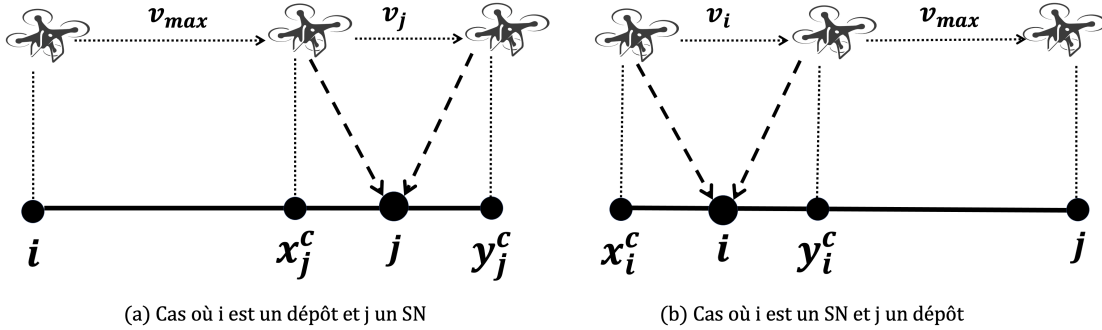


FIGURE 4.3 – mode de service de l'UAV entre un dépôt et un SN

Par conséquent, le temps de vol de l'UAV entre deux sommets i et j , $\forall(i, j) \in \mathcal{A}$, peut être représenté comme suit :

$$t_{ij}^f = \frac{d(i, j) - \theta_i d(i, y_i^c) - \theta_j d(x_j^c, j)}{v_{max}} + \theta_i \frac{d(i, y_i^c)}{v_i} + \theta_j \frac{d(x_j^c, j)}{v_j}, \forall(i, j) \in \mathcal{A} \quad (7)$$

Le temps de la mission de l'UAV ne se résume pas au temps de son vol, il faut aussi considérer le temps passé à chaque arrêt à un dépôt. En effet, au moment de son passage à un dépôt présenté par le sommet m , avec $c_m \in \mathcal{C}$, l'UAV se recharge et transmet les données collectées pendant un temps t_m^h . Ce temps dépend de deux contraintes : (i) la performance de chaque dépôt en termes de vitesse de recharge et (ii) le niveau de la batterie de l'UAV à l'arrivée au dépôt.

Soit T^r la durée d'une sous-trajectoire r (la trajectoire de l'UAV entre deux dé-

pôts). Nous avons donc :

$$T^r = \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij}^r t_{ij}^f + \sum_{c_m \in \mathcal{C}} \beta_m^r t_m^h \quad \forall (i,j) \in \mathcal{A}. \quad (8)$$

De ce fait, le temps total d'une mission complète de l'UAV est :

$$T = \sum_{r \in \mathcal{R}} T^r. \quad (9)$$

En plus, puisque l'UAV dessert chaque SN en mode vol continu, nous considérons t_i le temps nécessaire pour que l'UAV desserve le SN i durant l'intervalle $[x_i^c, y_i^c]$. Ce temps est inclus dans le temps de vol de l'UAV. Ensuite, nous supposons que le temps est partagé entre la collecte de données t_i^d et le transfert de l'énergie t_i^p selon un coefficient de partage de temps $\sigma \in [0, 1]$. Donc nous pouvons exprimer ces durées comme suit :

$$t_i = \frac{d(x_i^c, y_i^c)}{v_i} \quad (10)$$

$$t_i^d = \sigma t_i \quad (11)$$

$$t_i^p = (1 - \sigma) t_i \quad (12)$$

Pendant le vol de l'UAV, la distance entre celui-ci et le SN varie, ce qui entraîne une variation de l'affaiblissement de propagation. Cette variation peut affecter la qualité de la transmission des données. Pour maintenir un débit de transmission constant pendant la durée de service d'un SN, il est nécessaire d'ajuster la puissance de transmission du SN en fonction de la distance qui le sépare de l'UAV à tout instant. Ainsi, en adaptant la puissance de transmission, on peut compenser l'effet de l'affaiblissement de propagation et garantir un débit de transmission fixe. Le débit instantané de transmission des données d'un SN $i \in \mathcal{V}$ peut être comme suit (Gong *et al.*, 2018) :

$$R_i(t) = \frac{1}{2} W \log_2 \left(1 + \frac{p_i(t) \beta}{((d(x_i^c, i) - v_i)^2 + H^2)^{\frac{\alpha}{2}}} \right) \quad (13)$$

avec $t \in [0, t_i^d]$, W la bande passante, β le rapport signal sur bruit (SNR) de référence pour une distance d'un mètre, $\alpha \geq 2$ l'exposant d'affaiblissement de propagation et $p_i(t)$ la puissance de transmission du SN i à l'instant t . La puissance $p_i(t)$ doit satisfaire la contrainte suivante :

$$\int_0^{t_i^d} p_i(t) dt \leq E_i^D \quad (14)$$

où E_i^D est l'énergie consommée au niveau du SN i pendant la transmission de données vers l'UAV. En plus, puisque chaque SN i nécessite de transmettre b_i bits lorsque l'UAV survole $[x_i^c, y_j^c]$, alors le débit doit satisfaire la contrainte suivante :

$$\int_0^{t_i^d} R_i(t) dt \geq b_i \quad (15)$$

4.1.3 Modèle de la consommation de l'énergie des SN

Dans le modèle de réseau proposé, chaque SN passe par quatre phases : (a) la phase de récupération d'énergie de l'UAV, (b) la phase de transmission des données vers l'UAV, (c) la phase de veille et (d) la phase de collecte de données. Ces phases déterminent la consommation de l'énergie par le SN.

- a) **Phase de récupération d'énergie** : soit E_i^H l'énergie que transmet l'UAV au SN i . E_i^H est exprimée comme suit (Baek *et al.*, 2020b) :

$$E_i^H = t_i^p \eta P_u ((d(x_i^c, i) - v_i)^2 + H^2)^{-1} \quad (16)$$

où P_u représente la puissance de transmission de l'UAV, t_i^p est le temps nécessaire pour le transfert de l'énergie vers i et $\eta \in [0, 1]$ est l'efficacité de la conversion de l'énergie déterminée par le convertisseur.

- b) **Phase de transmission des données** : soit E_i^D l'énergie consommée au niveau du SN i pendant la transmission de données à l'UAV. Elle est exprimée comme suit :

$$E_i^D = t_i^d P_s \quad (17)$$

où P_s représente la puissance de transmission du SN et t_i^d est le temps nécessaire pour la collecte de données à partir du SN i .

- c) **Phase de sommeil** : soit E_i^0 l'énergie totale consommée durant la phase de sommeil du SN i . Pendant cette période, le capteur est généralement en mode d'économie d'énergie, ce qui réduit sa consommation au minimum nécessaire pour maintenir un fonctionnement de base, comme la surveillance de l'alimentation et des signaux de réveil.
- d) **Phase de collecte des données** : soit E_i^C l'énergie totale consommée par le SN i durant la phase de la collecte des données. Pendant cette période, le capteur consomme une partie de son énergie afin de collecter les données de son environnement.

En conséquence, l'énergie que transmet l'UAV à un SN i est exprimée sous la forme :

$$E_i^H = E_i^D + E_i^0 + E_i^C \quad (18)$$

4.1.4 Modèle de la consommation de l'énergie de l'UAV

Soit E^r l'énergie totale de l'UAV consommée entre deux dépôts, en parcourant la sous-trajectoire r : il s'agit de l'énergie que l'UAV consomme entre deux recharges successives. Cette énergie est composée de deux parties : l'énergie consommée pendant le vol de l'UAV et l'énergie consommée lors des transferts de puissance aux SN. Afin de modéliser la consommation de l'énergie de l'UAV entre deux sommets successifs $i, j \in \mathcal{V}$, nous distinguons trois cas : (i) consommation lors

d'un trajet entre un dépôt et un SN, (ii) consommation lors d'un trajet entre deux SN et (iii) consommation lors d'un trajet entre un SN et un dépôt. Pour les trois cas, l'énergie du vol entre les deux sommets est prise en compte. Par contre, l'énergie de transfert de puissance au SN est prise en compte uniquement quand le deuxième sommet est un SN. Par conséquent, l'énergie consommée par l'UAV entre deux sommets est donnée par :

$$E_{ij}^u = E_{ij}^f + \theta_j E_j^H \quad \forall (i, j) \in \mathcal{A} \quad (19)$$

avec E_{ij}^f l'énergie consommée pendant le vol de l'UAV entre les sommets i et j .

Soit $E_0(V)$ l'énergie consommée par l'UAV par unité de distance en J/m avec la vitesse V . En considérant un UAV à voilure tournante, la puissance de propulsion consommée pendant son vol peut être modélisée comme suit (Zeng *et al.*, 2019b) :

$$P(V) = \underbrace{P_0 \left(1 + \frac{3V^2}{U_{tip}^2} \right)}_{\text{profil de pale}} + \underbrace{P_i \left(\sqrt{1 + \frac{V^4}{4v_0^4}} - \frac{V^2}{2v_0^2} \right)^{1/2}}_{\text{induit}} + \underbrace{\frac{1}{2} d_0 \rho s A V^3}_{\text{parasite}} \quad (20)$$

où P_0 et P_i sont deux constantes représentant respectivement la puissance du profil de la pale du rotor et la puissance induite en vol stationnaire, U_{tip} désigne la vitesse de pointe de la pale du rotor, v_0 est la vitesse induite moyenne du rotor en vol stationnaire, d_0 et s sont respectivement le rapport de l'accélération du fuselage et la plénitude du rotor, et ρ et A désignent respectivement la densité de l'air et la surface du disque du rotor. Donc, selon (Zeng *et al.*, 2019b), l'énergie $E_0(V)$ peut être modélisée comme suit :

$$E_0(V) = \frac{P(V)}{V} = P_0 \left(\frac{1}{V} + \frac{3V}{U_{tip}^2} \right) + P_i \left(\sqrt{V^{-4} + \frac{1}{4v_0^4}} - \frac{1}{2v_0^2} \right)^{1/2} + \frac{1}{2} d_0 \rho s A V^2 \quad (21)$$

Donc l'énergie consommée pendant le vol de l'UAV entre les sommets i et j s'écrit comme suit :

$$E_{ij}^f = E_0(V)d(i, j) \quad \forall (i, j) \in \mathcal{A} \quad (22)$$

Par conséquent, l'énergie consommée par l'UAV pendant une sous-trajectoire est :

$$E^r = \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij}^r E_{ij}^f \quad \forall (i, j) \in \mathcal{A} \quad (23)$$

Donc, l'énergie de l'UAV entre deux dépôts ne doit pas dépasser son autonomie maximale, soit $E^r < E_{max}, \forall r \in \mathcal{R}$.

4.2 Formulation du problème

Malgré sa flexibilité et sa mobilité, la contrainte majeure de l'UAV est son autonomie énergétique limitée. Rappelons que la mission de l'UAV consiste à visiter chaque SN dans le réseau exactement une seule fois, en veillant à utiliser les dépôts pour se recharger lorsque cela s'avère nécessaire. Par conséquent, l'objectif du problème étudié est de minimiser le temps total de la mission de l'UAV en veillant à ce que chaque SN reçoive l'énergie nécessaire pour son fonctionnement et transmette les données collectées depuis le dernier passage de l'UAV, tout en optimisant le placement des dépôts et la trajectoire de l'UAV. La fonction objectif est formulée comme suit :

$$T = \sum_{r \in \mathcal{R}} T^r \quad (24)$$

Dans ce qui suit la vitesse de l'UAV est supposée fixe à V et le temps d'arrêt de l'UAV sur un dépôt pour se recharger ($t_m^h, \forall c_m \in \mathcal{C}$) est fixe aussi. De ce fait, la fonction objectif devient :

$$T = \frac{1}{V} \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} d(i, j) \sum_{r \in \mathcal{R}} \alpha_{ij}^r \quad (25)$$

Ce problème d'optimisation est soumis à plusieurs contraintes. Afin de s'assurer qu'un SN est visité exactement une seule fois pendant toute la mission de l'UAV, nous définissons la contrainte qui suit :

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} \beta_i^r = 1, \forall i \in \mathcal{S}. \quad (26)$$

Pour s'assurer que chaque SN est visité une seule fois pendant une sous-trajectoire r , il faut activer une seule arête entrante et une seule arête sortante. Nous définissons donc la contrainte suivante :

$$\sum_{\substack{j \in \mathcal{S} \\ j \neq i}} \alpha_{ij}^r = \sum_{\substack{j \in \mathcal{S} \\ j \neq i}} \alpha_{ji}^r = \beta_i^r, \forall i \in \mathcal{S}, \forall r \in \mathcal{R}. \quad (27)$$

La trajectoire de l'UAV doit commencer à partir d'un dépôt, donc le premier élément de la première sous-trajectoire indexé par 1 est le dépôt de départ. Supposons que le dépôt de départ est le sommet c . D'où la contrainte suivante :

$$\sum_{j \in \mathcal{S}} \alpha_{cj}^1 = 1. \quad (28)$$

Chaque sous-trajectoire r doit commencer par un dépôt de départ et terminer par un dépôt d'arrivée. Le dépôt d'arrivée de la sous-trajectoire r est bien le dépôt de départ de la sous-trajectoire $r + 1$. D'où la contrainte :

$$\sum_{i \in \mathcal{S}} \alpha_{ik}^r = \sum_{j \in \mathcal{S}} \alpha_{kj}^{r+1}, \forall k \in \mathcal{C}, \forall r \in \mathcal{R}. \quad (29)$$

Pour s'assurer que les variables d'optimisation α_{ij}^r et β_i^r soient égales à zéro ou un, nous définissons les contraintes :

$$\alpha_{ij}^r \in \{0, 1\}, \forall r \in \mathcal{R}, \forall (i, j) \in \mathcal{A} \quad (30)$$

$$\beta_i^r \in \{0, 1\}, \forall r \in \mathcal{R}, \forall i \in \mathcal{S}. \quad (31)$$

La consommation de l'énergie de l'UAV pendant une sous trajectoire r ne doit pas dépasser son niveau de batterie maximal. D'où la contrainte suivante :

$$E^r = \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} E_{ij}^f \alpha_{ij}^r + \sum_{i \in \mathcal{S}} E_i^H \beta_i^r \leq E_{max}, \forall r \in \mathcal{R}. \quad (32)$$

Résoudre le problème en considérant uniquement ce qui précède peut entraîner la création de sous-tours. Un sous-tour est défini comme une sous-trajectoire plus petite qui ne contient pas deux dépôts. Pour éliminer les sous-tours, nous utilisons les contraintes de Miller-Tucker-Zemlin (Sawik, 2016). Ainsi, nous formulons les contraintes suivantes :

$$u_i^r - u_j^r + (M + N + 2)\alpha_{ij}^r \leq M + N + 1, \forall (i, j) \in \mathcal{A}, i \neq j, \forall r \in \mathcal{R}. \quad (33)$$

où u_i^r est un entier défini comme suit :

$$u_i^r \in \{1, \dots, M + N + R - 1\}, \forall i \in \mathcal{V}, \forall r \in \mathcal{R}. \quad (34)$$

Par conséquent, le problème de minimisation du temps total de la mission de l'UAV en desservant tous les SN du WSN, tout en optimisant la trajectoire de l'UAV est formulé comme suit :

$$(P) \quad : \quad \underset{\beta_i^r, \alpha_{ij}^r}{\text{minimiser}} \quad \frac{1}{V} \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} d(i, j) \sum_{r \in \mathcal{R}} \alpha_{ij}^r$$

s.c. (26) – (34).

Clairement, afin de garder la linéarité du problème (P) , nous n'avons pas considéré l'optimisation du placement des dépôts dans notre formulation. Ceci dit, pour prendre en considération l'optimisation du placement des dépôts nous devrions introduire la variable binaire ε_l , prédéfinie plus tôt dans cette section, qui prend la valeur 1 si un dépôt est déployé dans le site d'infrastructure b_l . Et bien sûr, nous aurions besoin d'introduire une contrainte sur le nombre de dépôts à positionner, c.-à-d.

$$\sum_{l \in L} \varepsilon_l = M. \quad (35)$$

4.3 Analyse de la complexité : \mathcal{NP} -difficulté

Dans cette partie, nous allons prouver que le problème (P) formulé précédemment est un problème \mathcal{NP} -difficile. Dans un premier temps, nous allons reformuler le problème (P) en supposant que l'énergie de l'UAV est illimitée, c'est-à-dire que la contrainte (32) est éliminée. En plus, nous supposons que l'UAV peut démarrer sa mission par n'importe quel nœud, c'est-à-dire que les contraintes (28) et (29) du démarrage de l'UAV d'un dépôt initial et son passage par les dépôts intermédiaires sont supprimées. Notons la version reformulée de (P) par ($P1$).

Nous constatons que ($P1$) qui est un cas particulier de (P) est équivalent au problème du voyageur du commerce (TSP) classique, qui cherche à trouver le chemin le plus court pour visiter chaque nœud une seule fois et revenir au nœud initial. Comme TSP est un problème \mathcal{NP} -difficile (Avazbeigi, 2009), le problème (P) l'est aussi.

4.4 Solutions proposées

Cette section propose deux solutions algorithmiques au problème formulé dans la section précédente. En raison de la NP-dureté du problème, la première solution est un algorithme heuristique de complexité réduite basé sur l'algorithme de clustering K-Means et sur l'algorithme glouton du plus proche voisin (*Nearest Neighbor* - NN). La deuxième solution est une solution optimale qui utilise le solveur CPLEX et qui malgré sa complexité élevée, servira principalement à des fins de comparaison.

4.4.1 Solution heuristique KMeans-NN

L'algorithme heuristique KMeans-NN propose de résoudre le problème en deux phases distinctes. Le pseudo-code de l'algorithme est donné par Algorithme 1. Dans la première phase qui se résume à la ligne 1 de l'Algorithme 1, KMeans-NN va utiliser l'algorithme K-Means qui divise l'ensemble des capteurs en un nombre de M clusters, M étant le nombre de dépôts à déployer. Chaque cluster aura un unique centroïde et un dépôt sera déployé au niveau de l'infrastructure la plus proche de chaque centroïde comme le montre le pseudo-code de l'Algorithme 2. Dans la deuxième phase, après avoir déterminé les positions des dépôts, l'algorithme parcourt l'ensemble des capteurs pour construire le chemin de la trajectoire. La trajectoire commence à partir du premier dépôt à la ligne 3. À partir de la ligne 7 de l'Algorithme 1, il cherche le capteur le plus proche au dernier élément du chemin (soit le capteur courant). L'algorithme calcule ensuite l'énergie nécessaire pour déplacer l'UAV à ce capteur puis au dépôt le plus proche à la ligne 10. Si l'énergie disponible est suffisante, l'UAV visite ce capteur sinon il cherche un autre capteur accessible à la ligne 16. Si l'algorithme ne trouve pas un capteur adéquat, il cherche un meilleur dépôt pour déplacer l'UAV et le recharger à la ligne 21. À la fin du parcours de tous les capteurs, l'algorithme KMeans-NN calcule le temps total du vol et le temps d'arrêt aux dépôts intermédiaires durant la trajectoire à la ligne 24.

Algorithme 1 : KMeans-NN

initialiser : $\mathcal{S}, \mathcal{B}, M, E_{max}, V, E_H$

```

1  $\mathcal{C} \leftarrow KMeans(\mathcal{B}, \mathcal{S}, M)$ ;
2  $route \leftarrow \{C[1]\}$  ;                               /* trajectoire de l'UAV */
3  $E \leftarrow E_{max}$  ;                                   /* énergie de l'UAV */
4 tant que il reste des capteurs à visiter faire
5    $nCourant \leftarrow route[-1]$  ;                       /* dernier élément dans route */
6    $lnDispo \leftarrow$  liste des capteurs disponibles non visités;
7    $nTest \leftarrow 0$  ; /* indique si le prochain noeud est un capteur */
8   tant que lnDispo n'est pas vide ou  $e \geq E$  faire
9      $nProche \leftarrow$  le capteur disponible le plus proche de  $nCourant$ ;
10     $dProche \leftarrow$  le dépôt le plus proche de  $nProche$ ;
11     $d \leftarrow distance(nCourant, nProche) + distance(nProche, dProche)$ ;
12     $e \leftarrow E_{fly}(d) + E_H$  ; /* énergie requise pour parcourir d */
13    si  $e < E$  alors
14       $distProche \leftarrow distance(nCourant, nProche)$ ;
15       $E \leftarrow E - E_{fly}(distProche) - E_H$ ;
16       $route \leftarrow route \cup \{nProche\}$ ;
17       $nTest \leftarrow 1$ ;
18    sinon
19      Retirer  $nProche$  de la liste  $lnDispo$ ;
20  si  $nTest = 0$  alors
21     $nProche \leftarrow$  le capteur le plus proche de  $nCourant$ ;
22     $dMeilleur \leftarrow$  le meilleur dépôt pour s'approcher au  $nProche$ ;
23     $route \leftarrow route \cup \{dMeilleur\}$ ;
24     $E \leftarrow E_{max}$ ;
retourner :  $\mathcal{C}, route$ 

```

Algorithme 2 : KMeans

initialiser : $\mathcal{B}, \mathcal{S}, M$

```

1 initialiser l'ensemble de centroïdes  $\Gamma$  en choisissant aléatoirement  $M$  capteurs
   dans  $\mathcal{S}$ ;
2 pour  $m$  de 1 à  $M$  faire
3    $depot_m \leftarrow$  le dépôt le plus proche du centroïde  $\gamma_m$ ;
4 tant que la convergence n'est pas atteinte faire
5   pour chaque capteur dans  $\mathcal{S}$  faire
6     Affecter le capteur à son centroïde le plus proche parmi  $\Gamma$ ;
7   pour  $m$  de 1 à  $M$  faire
8      $cluster_m \leftarrow$  cluster formé à partir des capteurs affectés à  $\gamma_m$ ;
9   pour chaque  $cluster_m$  faire
10     $\gamma_m \leftarrow$  recalculer le nouveau centroïde comme la moyenne des
        distances aux capteurs de  $cluster_m$ ;
11     $depot_m \leftarrow$  le dépôt le plus proche du nouveau centroïde  $\gamma_m$ ;
retourner :  $\{depot_m\}_{m=1}^M$ 

```

4.4.1.1 Analyse de la complexité de l'algorithme KMeans-NN

La complexité de KMeans-NN peut être trouvée en analysant les deux parties principales de l'algorithme 1 : K-Means et NN. L'algorithme K-means converge généralement vers un minimum. Avant cette convergence, il effectue des calculs de distances et de centroïdes de clusters tout en exécutant des boucles un certain nombre de fois. Le nombre d'itérations K-means est désigné par l'entier positif t et sa valeur précise dépend des centroïdes initiaux. La distribution des points de données a une relation avec le nouveau centroïde du cluster, donc la complexité en temps de calcul de l'algorithme K-Means est $\mathcal{O}(NMt)$, où N est le nombre

des capteurs, M est le nombre des dépôts et t est le nombre des itérations de K-Means. En général $M \ll N$ et $t \ll N$ (Na *et al.*, 2010). Après l'exécution de K-Means, la boucle itère sur tous les capteurs en faisant exactement N itérations. À chaque itération, l'algorithme doit trouver le plus proche voisin non visité avec une complexité dans le pire des cas $\mathcal{O}(N)$. Par conséquent, la complexité du pire cas de KMeans-NN est $\mathcal{O}(NMt) + \mathcal{O}(N^2)$.

4.4.2 Solution optimale avec *CPLEX*

IBM CPLEX Optimizer est un solveur de programmation mathématique qui permet de résoudre des problèmes d'optimisation linéaire, mixte en nombres entiers et par contraintes (IBM, 2021). En raison de la nature de notre problème qui peut être décrite comme linéaire en nombre entiers, nous avons opté pour une solution optimale qui sera obtenue par l'utilisation de CPLEX. Comme le montre la figure 4.4, l'algorithme optimal procède par le choix d'une combinaison de dépôts parmi les infrastructures. Puis il initialise le nombre de sous-trajectoires à $R = 1$, c'est-à-dire que la trajectoire de l'UAV ne contiendra aucun arrêt intermédiaire pour se recharger. Ensuite le solveur lance la recherche de la trajectoire optimale considérant R . À cette étape, l'algorithme teste si une solution est trouvée par le solveur. Dans le cas où le solveur ne retourne pas de solution faisable, l'algorithme incrémente le nombre de sous-trajectoires R et relance le solveur. Une fois une solution trouvée, l'algorithme la sauvegarde dans une liste et il procède aux mêmes étapes en utilisant une autre combinaison de dépôts. À la fin, l'algorithme retourne, depuis la liste construite, la trajectoire optimale ayant un temps minimal et la combinaison de dépôts qui lui correspond.

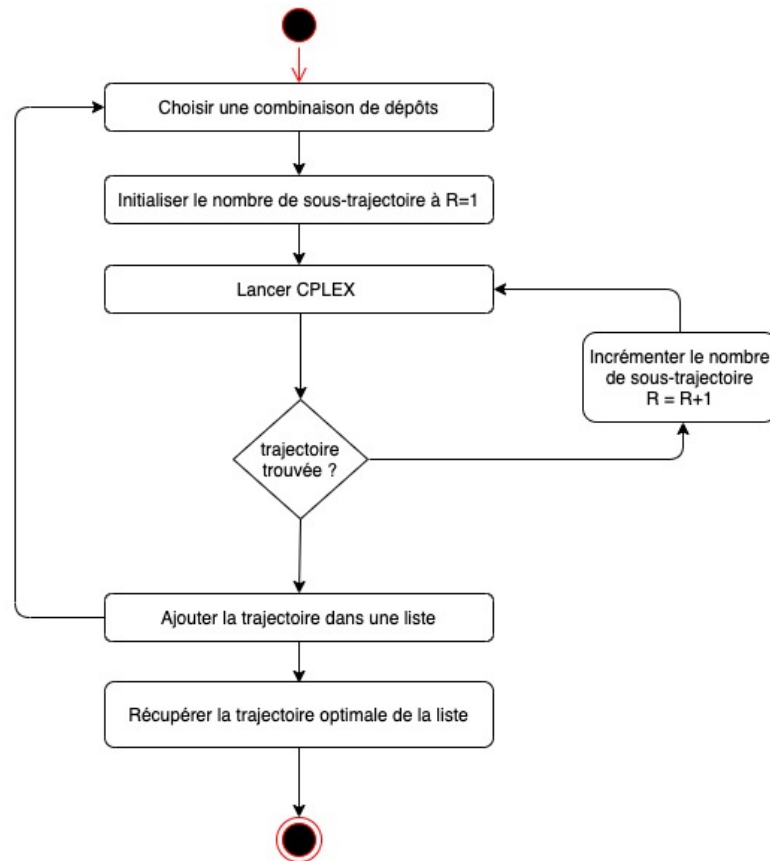


FIGURE 4.4 – solution optimale

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par définir notre modèle du système, formuler le problème et étudier sa \mathcal{NP} -difficulté. Ensuite, nous avons présenté les détails de nos deux approches proposées. La première solution est un algorithme heuristique qui se base sur l'approche gloutonne du plus proche voisin qui consiste à optimiser la trajectoire de l'UAV. La deuxième solution est une solution optimale qui se base sur l'utilisation du solveur CPLEX. Dans le chapitre suivant, nous allons évaluer les performances des solutions et discuter les résultats obtenus.

CHAPITRE V

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de la simulation pour comparer les performances des solutions proposées dans le chapitre précédent. Nous allons définir d’abord les paramètres utilisés dans les simulations. Ensuite le chapitre fournit une comparaison des performances de la solution heuristique KMeans-NN, la solution optimale avec CPLEX et d’autres combinaisons d’algorithmes.

5.1 Paramètres de simulation

Afin de bien choisir nos paramètres de la simulation nous nous sommes référé à l’article (Wu *et al.*, 2020). Les auteurs de l’article ont considéré un drone quadricoptère avec un moteur DJI2312E KV960, une hélice DJI CFP 9×4.7, un contrôleur de vitesse électronique DJI E305 et une batterie ACE LiPo 3S-11.1V-15C-800-mAh en s’appuyant sur Flyeval¹. En effet, cet UAV peut supporter plusieurs types de batterie et par conséquent l’énergie maximale de la batterie peut varier entre $E_{max} = 13$ kJ et $E_{max} = 100$ kJ selon quelques exemples consultés sur Flyeval. Pour nos simulations, nous supposons que $E_{max} = 20$ kJ et que les autres paramètres prennent, sauf indication contraire, les valeurs présentées dans

1. <https://flyeval.com>

le tableau 5.1.

Paramètres	Valeurs
Zone géographique	3000 m \times 3000 m
N	varie entre 8 et 28 capteurs
L	6 et 8
M	3
H	50 m
v_{max}	10 m/s
t_m^h	5 s
σ	0,8
P_u	15 W
P_p	30 W
E_{max}	20 kJ

TABLEAU 5.1 – tableau de paramètres

5.2 Solutions de référence

5.2.1 BFE-NN

Le BFE-NN (Brute Force Enumeration - Nearest Neighbor) est un algorithme qui repose sur une approche exhaustive de recherche de solutions en évaluant toutes les possibilités de placement des dépôts. Pour chaque combinaison potentielle de dépôts, l'algorithme calcule la trajectoire en utilisant notre solution basée sur la méthode du NN, et le résultat final correspond à la trajectoire minimale parmi toutes les possibilités.

5.2.2 Random-NN

Dans Random-NN, indépendamment de la position des capteurs, le choix du placement des dépôts est aléatoire. L'UAV suit une trajectoire choisie par notre algorithme NN. Cependant, tout comme dans Kmeans-NN, Random-NN doit respecter la contrainte d'énergie de l'UAV.

5.2.3 Optimal (BFE-Cplex)

Comme déjà mentionné dans la section solution 4.3, la solution optimale est obtenue en utilisant un algorithme de type branch-and-bound grâce à l'utilisation d'un solveur linéaire d'entiers binaires appliqué au problème (P). Dans les simulations suivantes, nous utilisons le solveur IBM CPLEX tandis que le problème (P) est écrit en Python en utilisant la bibliothèque PuLP.

5.2.4 Random-Cplex

Dans Random-Cplex, indépendamment de la position des capteurs, le choix du placement des dépôts est aléatoire. L'UAV suit une trajectoire choisie par notre algorithme utilisant CPLEX. Cependant, tout comme dans Kmeans-NN, Random-Cplex doit respecter la contrainte d'énergie de l'UAV.

5.2.5 Kmeans-Cplex

Contrairement au Random-Cplex, Kmeans-Cplex utilise Kmeans pour le choix du placement des dépôts. Ensuite, l'UAV suit une trajectoire choisie par notre algorithme utilisant CPLEX. Cependant, tout comme dans Kmeans-NN, Kmeans-Cplex doit respecter la contrainte d'énergie de l'UAV.

5.3 Comparaison des performances des solutions proposées

Nous supposons que les capteurs sont uniformément répartis de manière aléatoire dans une zone carrée de $3000 \times 3000 \text{ m}^2$. De plus, nous divisons cette zone en 6 régions et positionnons une infrastructure au centre de chaque région. Tous les résultats des figures suivantes sont calculés sur la moyenne de 200 instances aléatoires.

Pour nos simulations, nous avons utilisé un ordinateur MacBook Pro (16-inch, 2019) équipé d'un processeur Intel Core i7 6 cœurs cadencé à 2,6 GHz et 16 Go de mémoire RAM DDR4 à 2667 MHz. Les performances graphiques étaient assurées par la carte intégrée Intel UHD Graphics 630 avec une mémoire dédiée de 1536 Mo.

Dans la figure 5.1, nous comparons les différentes trajectoires proposées par nos algorithmes. Ces illustrations sont basées sur une distribution de $N = 14$ capteurs et un nombre de dépôts de $M = 3$.

Nous observons clairement des variations dans le positionnement des dépôts et la trajectoire de l'UAV entre ces différentes solutions. Il est intéressant de noter que l'optimisation indépendante du placement des dépôts et de la trajectoire conduit à des résultats différents de l'optimisation conjointe, comme le montrent les figures (a)-(c) et (b)-(d). Les figures (a) et (b) représentent les résultats obtenus avec l'algorithme K-means pour le placement des dépôts, suivi de la conception de la trajectoire en utilisant ces emplacements. En revanche, les figures (c) et (d) représentent les résultats de la trajectoire optimale de l'UAV en explorant différentes combinaisons d'emplacements de dépôts.

Il est également important de souligner que l'optimisation réalisée par l'algorithme BFE-NN (c) permet d'obtenir un temps de mission meilleur que l'approche K-

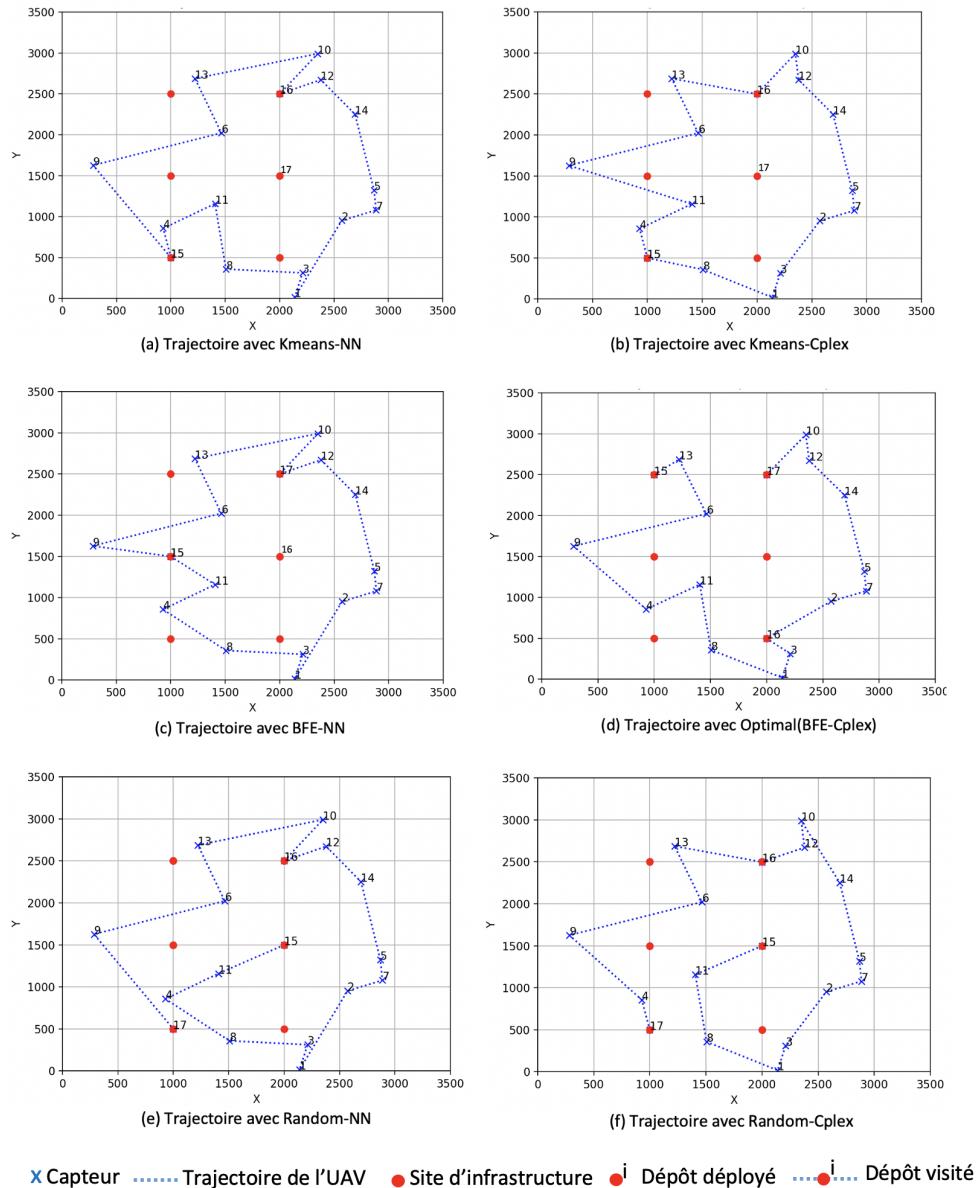


FIGURE 5.1 – exemple de trajectoires pour les six algorithmes proposés

means-NN (a), même si les deux résultats nécessitent une seule recharge intermédiaire. Ces observations mettent en évidence l'importance de l'optimisation conjointe du placement des dépôts et de la trajectoire de l'UAV pour améliorer les performances globales du système.

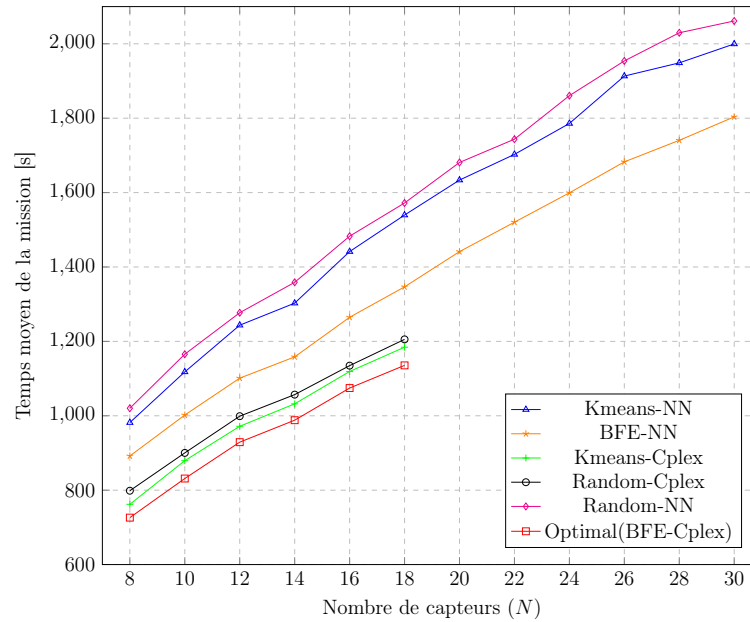


FIGURE 5.2 – temps moyen de la mission en fonction du nombre de capteurs

La figure 5.2 présente le temps total moyen de mission nécessaire à l’UAV pour desservir tous les capteurs en fonction du nombre de capteurs. Nous considérons une énergie maximale de l’UAV $E_{max} = 20kJ$. En raison de la grande complexité de la solution CPLEX, les performances ne peuvent pas être obtenues en temps raisonnable pour des valeurs supérieures à 18 capteurs pour les algorithmes Random-Cplex, Kmeans-Cplex et Optimal(BFE-Cplex). Le tableau 5.2 met en évidence une comparaison de temps d’exécution des algorithmes utilisés et montre l’augmentation significative du temps de simulation entre 16 et 18 capteurs.

Comme prévu, sur la figure 5.2, nous constatons que le temps total de mission augmente à mesure que le nombre de capteurs augmente. Nous observons aussi qu’il existe un écart d’optimisation entre les algorithmes heuristiques Kmeans-NN et BFE-NN et les algorithmes utilisant le solveur CPLEX Kmeans-Cplex et Optimal(BFE-Cplex). Et en se référant à l’analyse de la figure 5.1, nous observons la performance des algorithmes qui proposent une solution d’optimisation

Nombre de capteurs	Kmeans-NN	BFE-NN	Kmeans-Cplex	Optimal
8	0 : 00 : 03.26	0 : 00 : 01.92	0 : 00 : 30.24	0 : 07 : 57.40
10	0 : 00 : 03.96	0 : 00 : 02.19	0 : 00 : 47.12	0 : 14 : 14.20
12	0 : 00 : 04.74	0 : 00 : 02.37	0 : 01 : 18.83	0 : 30 : 00.02
14	0 : 00 : 05.58	0 : 00 : 02.77	0 : 02 : 09.44	0 : 57 : 44.89
16	0 : 00 : 06.41	0 : 00 : 03.17	0 : 03 : 44.88	2 : 40 : 33.22
18	0 : 00 : 06.76	0 : 00 : 03.37	0 : 07 : 38.78	12 : 11 : 14.25

TABLEAU 5.2 – tableau de temps d’exécution des algorithmes en ($h : mm : ss$)

conjointe du placement des dépôts et de la trajectoire de l’UAV par rapport aux algorithmes qui proposent une solution d’optimisation indépendante. C’est-à-dire que le BFE-NN est plus performant que Kmeans-NN et Optimal(BFE-Cplex) est plus performant que Kmeans-Cplex. De plus, nous observons que l’amélioration des performances obtenue en utilisant CPLEX au lieu de NN (les deux courbes Kmeans-Cplex et Kmeans-NN) est plus significative que celle obtenue en utilisant BFE au lieu de Kmeans (les deux courbes BFE-NN et Kmeans-NN). Cela suggère que l’algorithme de calcul de la trajectoire a un impact plus important sur les performances globales que l’algorithme de positionnement des dépôts.

La figure 5.3 présente le nombre moyen de recharges intermédiaires que l’UAV a effectué durant sa mission en fonction du nombre de capteurs dans le réseau.

Nous constatons qu’en ajoutant plus de capteurs dans le réseau, l’UAV a besoin de réaliser plus de sous-trajectoires et par conséquent aura tendance à effectuer plus de détours afin de se recharger. Et comme pour la figure 5.2, nous observons aussi qu’il existe un écart d’optimisation entre les algorithmes heuristiques Kmeans-NN et BFE-NN et les algorithmes utilisant le solveur CPLEX Kmeans-Cplex et

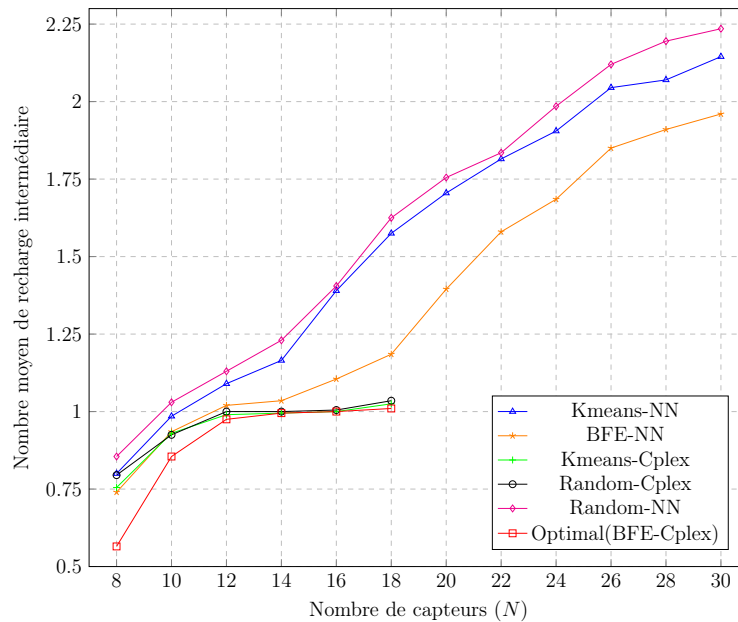


FIGURE 5.3 – nombre moyen de recharges intermédiaires en fonction du nombre de capteurs

Optimal(BFE-Cplex) et cela à partir de 12 capteurs.

De plus, comme pour les résultats de la figure 5.2, nous observons que l'amélioration du nombre de détours de l'UAV obtenue en utilisant CPLEX au lieu de NN (les deux courbes Kmeans-Cplex et Kmeans-NN) est plus significative que celle obtenue en utilisant BFE au lieu de Kmeans (les deux courbes BFE-NN et Kmeans-NN). Cela implique que tant que la trajectoire est mieux optimisée, le besoin de recharge pendant cette trajectoire est minimisé au besoin, donc l'UAV fait moins de détours inutiles.

La figure 5.4 illustre le temps total moyen de mission nécessaire à l'UAV pour desservir quatorze capteurs en fonction de la variation de l'énergie maximale. Nous avons effectué des simulations pour différentes valeurs d'énergie maximale de l'UAV, cependant, nous n'avons pas pu simuler une énergie maximale inférieure à 16 kJ dû à l'infaisabilité des solutions avec cette énergie insuffisante. Cette

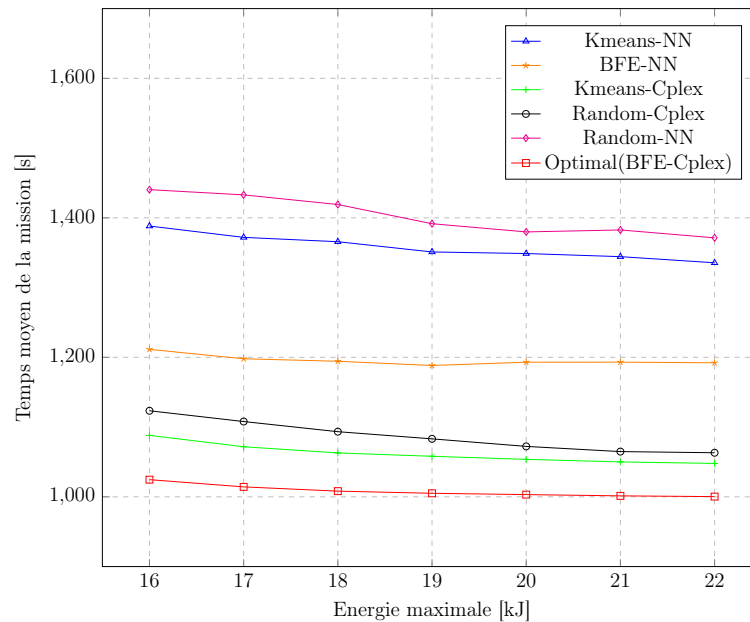


FIGURE 5.4 – temps moyen de la mission en fonction de l'énergie maximale de l'UAV

observation souligne l'importance du choix de l'énergie de l'UAV pour garantir le succès de sa mission.

De plus, nous observons que le temps de mission diminue légèrement lorsque l'énergie maximale de l'UAV est augmentée, jusqu'à atteindre une certaine saturation. Cela met en évidence le fait que tant que l'UAV dispose d'une quantité d'énergie suffisante pour accomplir sa mission, il suivra la même trajectoire. Ces résultats suggèrent qu'il est essentiel d'équiper l'UAV d'une batterie disposant d'une quantité d'énergie maximale adéquate pour optimiser la durée de la mission et garantir une performance optimale.

La figure 5.5 présente le temps total moyen de la mission de l'UAV pour desservir quatorze capteurs en fonction de la variation du nombre de dépôts disponibles. Dans cette simulation, nous avons divisé la zone de $3000 \times 3000\text{m}^2$ en 8 secteurs, avec une infrastructure positionnée au centre de chaque secteur. Initialement, nous

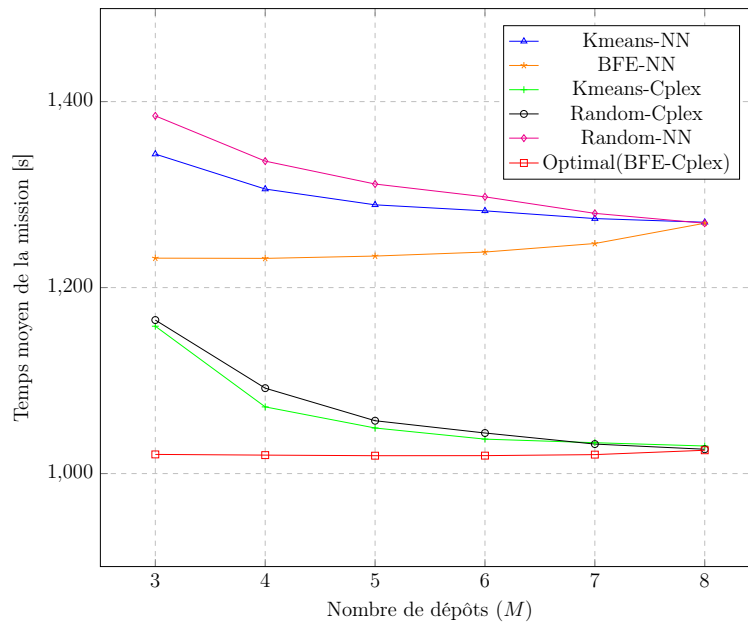


FIGURE 5.5 – temps moyen de la mission en fonction du nombre de dépôts

avons choisi $M = 3$ dépôts parmi les 8 infrastructures, puis nous avons ajouté un dépôt supplémentaire à chaque itération jusqu'à ce que les 8 infrastructures soient toutes utilisées.

Nous remarquons tout d'abord une légère augmentation de la courbe pour l'algorithme BFE-NN, ce qui suggère que l'algorithme NN peut prendre de mauvaises décisions lorsqu'il s'agit de choisir le prochain capteur à visiter. Ensuite, nous constatons qu'à mesure que nous offrons plus de positions de dépôts, nous observons une amélioration légère de la durée de la mission. Cependant, à partir de 5 dépôts, l'ajout de dépôts supplémentaires n'apporte plus d'améliorations significatives.

En conclusion, notre étude démontre que la simple disponibilité d'un nombre important de dépôts dans une zone ne garantit pas une amélioration significative des performances. Au contraire, notre analyse met en évidence que l'optimisation de

la trajectoire de l'UAV joue un rôle déterminant dans l'obtention de performances optimales. En effet, une trajectoire bien conçue permet à l'UAV de minimiser les déplacements inutiles. Par conséquent, il est crucial de consacrer des efforts supplémentaires pour développer des méthodes et des algorithmes avancés visant à optimiser la trajectoire de l'UAV dans les systèmes de ce type. Cette approche permettra d'exploiter pleinement le potentiel des dépôts disponibles et de garantir des performances supérieures dans les réseaux de capteurs sans fil assistés par UAV.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une évaluation approfondie des solutions proposées, en analysant leurs résultats et en les comparant entre elles. Nous avons également étudié l'impact des différents paramètres du système sur les performances de ces solutions. Nos résultats ont démontré l'efficacité des approches proposées pour résoudre le problème spécifique étudié.

CONCLUSION

Ce projet a étudié le problème d'optimisation conjointe du positionnement des dépôts de recharge électrique et de la trajectoire d'un UAV dans un réseau WSN. Le problème a été modélisé comme un problème linéaire binaire en nombres entiers, visant à minimiser le temps de mission de l'UAV tout en desservant tous les capteurs et en respectant les contraintes énergétiques.

Étant donné que le problème d'optimisation considéré a été démontré comme étant \mathcal{NP} -difficile, nous avons proposé une solution heuristique gloutonne qui se caractérise par sa complexité algorithmique réduite et une solution basée sur un solveur qui permet d'obtenir la solution optimale mais qui nécessite un temps de calcul élevé. Les résultats de la simulation ont démontré que la solution heuristique présente un compromis intéressant entre les performances et la complexité de calcul. Ils ont également révélé l'efficacité des solutions algorithmiques proposées en termes du nombre de dépôts positionnés pour répondre pleinement aux exigences de collecte de données et de transfert d'énergie à tous les capteurs.

Ce travail apporte une contribution importante à l'amélioration des performances d'un réseau WSN assisté par UAV en proposant des approches d'optimisation pour le positionnement des dépôts et la conception de la trajectoire de l'UAV. Les résultats obtenus confirment l'efficacité des méthodes proposées et soulignent l'importance de considérer l'optimisation conjointe pour atteindre des performances optimales.

Les perspectives de ce projet sont multiples et prometteuses. Tout d'abord, il serait intéressant d'explorer de nouvelles approches d'optimisation pour continuer

à améliorer les performances du système. Cela pourrait inclure l'intégration de contraintes supplémentaires telles que la qualité de service et la gestion de l'énergie, afin de mieux répondre aux besoins spécifiques des applications. De plus, il serait bénéfique d'étendre l'étude à des réseaux WSN de plus grande envergure, pour évaluer les performances et la scalabilité des solutions proposées dans des scénarios plus complexes.

En implémentant des modifications mineures aux solutions proposées, la notion de capteurs hétérogènes peut être intégrée en tenant compte des différences dans leurs besoins énergétiques et les quantités de données qu'ils transmettent. Cela permettrait d'adapter les ressources de manière plus fine et efficace, en allouant davantage d'énergie et de capacité de transmission aux capteurs qui en ont le plus besoin.

Enfin, une perspective prometteuse consisterait à développer une solution basée sur l'apprentissage automatique pour résoudre de manière plus efficace le compromis entre les performances et le temps de calcul. Cela permettrait de trouver des solutions optimales en exploitant les données du système, tout en réduisant la complexité du processus d'optimisation.

Ces perspectives ouvrent la voie à de nouvelles avancées dans le domaine de la planification et de l'optimisation des réseaux WSN assistés par UAV, et offrent des opportunités pour des solutions plus performantes et adaptatives.

RÉFÉRENCES

- Al-Hourani, A., Kandeepan, S. et Lardner, S. (2014). Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(6), 569–572.
- Alhassoun, N. S. et Venkatasubramanian, N. (2020). Cross-Layer Energy Optimization for IoT-Enabled Smart Spaces. Dans *2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 1–2.
- Ali, I., Ahmedy, I., Gani, A., Munir, M. U. et Anisi, M. H. (2022). Data Collection in Studies on Internet of Things (IoT), Wireless Sensor Networks (WSNs), and Sensor Cloud (SC) : Similarities and Differences. *IEEE Access*, 10, 33909–33931.
- Avazbeigi, M. (2009). *An Overview of Complexity Theory*, Dans R. Zanjirani Farahani et M. Hekmatfar (dir.). *Facility Location : Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*, (p. 19–36). Physica-Verlag HD : Heidelberg.
- Baek, J., Han, S. I. et Han, Y. (2020a). Energy-Efficient UAV Routing for Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(2), 1741–1750.
- Baek, J., Han, S. I. et Han, Y. (2020b). Optimal UAV Route in Wireless Charging Sensor Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(2), 1327–1335.
- Benmad, I., Driouch, E. et Kardouchi, M. (2022). Trajectory Planning for Data Collection in Multi-UAV Assisted WSNs. Dans *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference : (VTC2022-Spring)*, 1–6.

- Chaudhary, A. et Peddoju, S. K. (2021). Impact of Clustering Algorithms and Energy Harvesting Scheme on IoT/WSN Infrastructures. Dans *2021 IEEE 18th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS)*, 603–608.
- Chen, D., Zhong, J., Hu, Y., Li, Y. et Wang, J. (2023). Efficient Trajectory Planning for UAV-Relaying Maritime Communication Systems. Dans *2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, 1–6.
- Chen, R., Sun, Y., Liang, L. et Cheng, W. (2022). Joint Power Allocation and Placement Scheme for UAV-Assisted IoT With QoS Guarantee. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(1), 1066–1071.
- Chniguir, A. et Ben Jemaa, Z. (2022). Lifetime maximization of the first dead node in a WSN. Dans *2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 378–383.
- Choi, H.-H., Ron, D., Sengly, M. et Lee, J.-R. (2020). Energy-Neutral Wireless Sensor Network Based on SWIPT in Wireless Powered Communication Networks. Dans *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–7.
- Dash, L. et Khuntia, M. (2020). Energy efficient techniques for 5G mobile networks in WSN : A Survey. Dans *2020 International Conference on Computer Science, Engineering and Applications (ICCSEA)*, 1–5.
- Di Franco, C. et Buttazzo, G. (2015). Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs. Dans *2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, 111–117.
- Fotouhi, A., Qiang, H., Ding, M., Hassan, M., Giordano, L. G., Garcia-Rodriguez, A. et Yuan, J. (2019). Survey on UAV Cellular Communications : Practical

- Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3417–3442.
- Gandotra, P., Jha, R. K. et Jain, S. (2017). Green Communication in Next Generation Cellular Networks : A Survey. *IEEE Access*, 5, 11727–11758.
- Gao, J., Wu, R., Hao, J., Xu, C. et Guo, H. (2022). SWIPT-Based Energy Scheduling for Solar-Powered WSN in Full-Duplex Mode. *IEEE Sensors Journal*, 22(13), 13668–13681.
- Gedeon, J., Krisztinkovics, J., Meurisch, C., Stein, M., Wang, L. et Mühlhäuser, M. (2018). A Multi-Cloudlet Infrastructure for Future Smart Cities : An Empirical Study. Dans *Proceedings of the 1st International Workshop on Edge Systems, Analytics and Networking*, EdgeSys'18, p. 19–24.
- Ghaffari, A. (2014). An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks using A-star Algorithm. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(4), 815–822.
- Gong, J., Chang, T.-H., Shen, C. et Chen, X. (2018). Flight Time Minimization of UAV for Data Collection Over Wireless Sensor Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(9), 1942–1954.
- Gungor, V. C. et Hancke, G. P. (2009). Industrial Wireless Sensor Networks : Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), 4258–4265.
- Guo, S., Shi, Y., Yang, Y. et Xiao, B. (2018). Energy Efficiency Maximization in Mobile Wireless Energy Harvesting Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 17(7), 1524–1537.

- Guo, S., Wang, F., Yang, Y. et Xiao, B. (2015). Energy-Efficient Cooperative Tfor Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in Clustered Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 63(11), 4405–4417.
- He, H., Zhang, S., Zeng, Y. et Zhang, R. (2018). Joint Altitude and Beamwidth Optimization for UAV-Enabled Multiuser Communications. *IEEE Communications Letters*, 22(2), 344–347.
- Heinzelman, W., Chandrakasan, A. et Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Dans *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 10 pp. vol.2–.
- Hossain, M. A., Md Noor, R., Yau, K.-L. A., Ahmedy, I. et Anjum, S. S. (2019). A Survey on Simultaneous Wireless Information and Power Transfer With Cooperative Relay and Future Challenges. *IEEE Access*, 7, 19166–19198.
- Hu, H., Xiong, K., Qu, G., Ni, Q., Fan, P. et Letaief, K. B. (2021). AoI-Minimal Trajectory Planning and Data Collection in UAV-Assisted Wireless Powered IoT Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(2), 1211–1223.
- Hua, M., Yang, L., Wu, Q. et Swindlehurst, A. L. (2020). 3D UAV Trajectory and Communication Design for Simultaneous Uplink and Downlink Transmission. *IEEE Transactions on Communications*, 68(9), 5908–5923.
- Huang, F., Chen, J., Wang, H., Ding, G., Xue, Z., Yang, Y. et Song, F. (2019). UAV-Assisted SWIPT in Internet of Things With Power Splitting : Trajectory Design and Power Allocation. *IEEE Access*, 7, 68260–68270.
- IBM (2021). CPLEX Optimizer - France | IBM. Récupéré le 2023 de https://www.ibm.com/fr-fr/analytics/cplex-optimizer?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=cplex

- Jia, Z., Qin, X., Wang, Z. et Liu, B. (2019). Age-Based Path Planning and Data Acquisition in UAV-Assisted IoT Networks. Dans *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1–6.
- Kalantari, E., Yanikomeroglu, H. et Yongacoglu, A. (2016). On the Number and 3D Placement of Drone Base Stations in Wireless Cellular Networks. Dans *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 1–6.
- Khalifeh, A. F., Abid, H. et Darabkh, K. A. (2020). Double Mobility WSN : Exploiting the Mobility of Sink and Cluster Head Nodes for Better WSN Energy Preservation and Lifetime. Dans *2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, 1–4.
- Lakew, D. S., Masood, A. et Cho, S. (2020). 3D UAV Placement and Trajectory Optimization in UAV Assisted Wireless Networks. Dans *2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 80–82.
- Li, J., Zhao, H., Wang, H., Gu, F., Wei, J., Yin, H. et Ren, B. (2020). Joint Optimization on Trajectory, Altitude, Velocity, and Link Scheduling for Minimum Mission Time in UAV-Aided Data Collection. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(2), 1464–1475.
- Lu, W., Xu, X., Huang, G., Li, B., Wu, Y., Zhao, N. et Yu, F. R. (2021). Energy Efficiency Optimization in SWIPT Enabled WSNs for Smart Agriculture. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4335–4344.
- López-Pérez, D., Ding, M., Li, H., Giordano, L. G., Geraci, G., Garcia-Rodriguez, A., Lin, Z. et Hassan, M. (2018). On the Downlink Performance of UAV Communications in Dense Cellular Networks. Dans *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1–7.

- Masoud, M. Z., Jaradat, Y., Zaidan, D. et Jannoud, I. (2019). To Cluster or Not to Cluster : A Hybrid Clustering Protocol for WSN. Dans *2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)*, 678–682.
- Mazumdar, N., Roy, S. et Nayak, S. (2018). A Survey on Clustering Approaches for Wireless Sensor Networks. Dans *2018 2nd International Conference on Data Science and Business Analytics (ICDSBA)*, 236–240.
- Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M. et Debbah, M. (2015). Drone Small Cells in the Clouds : Design, Deployment and Performance Analysis. Dans *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1–6.
- Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M. et Debbah, M. (2017). Mobile Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Energy-Efficient Internet of Things Communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(11), 7574–7589.
- Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y.-H. et Debbah, M. (2019). A Tutorial on UAVs for Wireless Networks : Applications, Challenges, and Open Problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2334–2360.
- Na, S., Xumin, L. et Yong, G. (2010). Research on k-means Clustering Algorithm : An Improved k-means Clustering Algorithm. Dans *2010 Third International Symposium on Intelligent Information Technology and Security Informatics*, 63–67.
- Nguyen, M. T. et Le, L. B. (2022). Multi-UAV Trajectory Control, Resource Allocation, and NOMA User Pairing for Uplink Energy Minimization. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(23), 23728–23740.
- Nouri, N., Abouei, J., Sepasian, A. R., Jaseemuddin, M., Anpalagan, A. et Plataniotis, K. N. (2022). Three-Dimensional Multi-UAV Placement and Resource

- Allocation for Energy-Efficient IoT Communication. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(3), 2134–2152.
- Pantazis, N. A., Nikolidakis, S. A. et Vergados, D. D. (2013). Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks : A Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(2), 551–591.
- Ponnimbaduge Perera, T. D., Jayakody, D. N. K., Sharma, S. K., Chatzinotas, S. et Li, J. (2018). Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) : Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(1), 264–302.
- Potthuri, S., Shankar, T. et Rajesh, A. (2018). Lifetime Improvement in Wireless Sensor Networks using Hybrid Differential Evolution and Simulated Annealing (DESA). *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 655–663.
- Saad, W., Bennis, M., Mozaffari, M. et Lin, X. (2020). *Wireless Communications and Networking for Unmanned Aerial Vehicles*. Cambridge University Press.
- Sah, D. K., Hazra, A., Mazumdar, N. et Amgoth, T. (2023). An Efficient Routing Awareness Based Scheduling Approach in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*, 23(15), 17638–17647. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2023.3279249>
- Sawik, T. (2016). A note on the Miller-Tucker-Zemlin model for the asymmetric traveling salesman problem. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences : Technical Sciences*, 64(No 3), 517–520.
- Shaikh, F. K. et Zeadally, S. (2016). Energy harvesting in wireless sensor networks : A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1041–1054.

- Shakoor, S., Kaleem, Z., Baig, M. I., Chughtai, O., Duong, T. Q. et Nguyen, L. D. (2019). Role of UAVs in Public Safety Communications : Energy Efficiency Perspective. *IEEE Access*, 7, 140665–140679.
- Sharma, V., Sabatini, R. et Ramasamy, S. (2016). UAVs Assisted Delay Optimization in Heterogeneous Wireless Networks. *IEEE Communications Letters*, 20(12), 2526–2529.
- Vitello, P., Capponi, A., Fiandrino, C., Cantelmo, G. et Kliazovich, D. (2019). The Impact of Human Mobility on Edge Data Center Deployment in Urban Environments. Dans *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1–6.
- Wang, H., Ren, G., Chen, J., Ding, G. et Yang, Y. (2018). Unmanned Aerial Vehicle-Aided Communications : Joint Transmit Power and Trajectory Optimization. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(4), 522–525.
- Wang, Y., Gao, Z., Zhang, J., Cao, X., Zheng, D., Gao, Y., Ng, D. W. K. et Renzo, M. D. (2022). Trajectory Design for UAV-Based Internet of Things Data Collection : A Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(5), 3899–3912.
- Wang, Y., Hu, Z., Wen, X., Lu, Z. et Miao, J. (2020). Minimizing Data Collection Time With Collaborative UAVs in Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, 8, 98659–98669.
- Wei, Z., Zhu, M., Zhang, N., Wang, L., Zou, Y., Meng, Z., Wu, H. et Feng, Z. (2022). UAV-Assisted Data Collection for Internet of Things : A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(17), 15460–15483.
- Wu, P., Xiao, F., Huang, H., Sha, C. et Yu, S. (2020). Adaptive and Exten-

- sible Energy Supply Mechanism for UAVs-Aided Wireless-Powered Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(9), 9201–9213.
- Wu, Q., Zeng, Y. et Zhang, R. (2018). Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(3), 2109–2121.
- Yetgin, H., Cheung, K. T. K., El-Hajjar, M. et Hanzo, L. H. (2017). A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2), 828–854.
- Zeng, Y., Wu, Q. et Zhang, R. (2019a). Accessing From the Sky : A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond. *Proceedings of the IEEE*, 107(12), 2327–2375.
- Zeng, Y., Xu, J. et Zhang, R. (2019b). Energy Minimization for Wireless Communication With Rotary-Wing UAV. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(4), 2329–2345.
- Zeng, Y., Zhang, R. et Lim, T. J. (2016a). Throughput Maximization for UAV-Enabled Mobile Relaying Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 64(12), 4983–4996.
- Zeng, Y., Zhang, R. et Lim, T. J. (2016b). Wireless communications with unmanned aerial vehicles : opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42.
- Zhan, C. et Zeng, Y. (2019). Completion Time Minimization for Multi-UAV-Enabled Data Collection. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(10), 4859–4872.

- Zhan, C., Zeng, Y. et Zhang, R. (2018). Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(3), 328–331.
- Zhao, N., Lu, W., Sheng, M., Chen, Y., Tang, J., Yu, F. R. et Wong, K.-K. (2019). UAV-Assisted Emergency Networks in Disasters. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 45–51.
- Zhu, B., Bedeer, E., Nguyen, H. H., Barton, R. et Henry, J. (2021). UAV Trajectory Planning in Wireless Sensor Networks for Energy Consumption Minimization by Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(9), 9540–9554.
- İlker Bekmezci, Sahingoz, O. K. et Şamil Temel (2013). Flying Ad-Hoc Networks (FANETs) : A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 1254–1270.