



HAL
open science

Déploiement temporaire d'une infrastructure de communication à base de drones

Dorin Marian Rautu

► **To cite this version:**

Dorin Marian Rautu. Déploiement temporaire d'une infrastructure de communication à base de drones. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2019. Français. NNT : 2019INPT0086 . tel-04169297

HAL Id: tel-04169297

<https://theses.hal.science/tel-04169297>

Submitted on 24 Jul 2023

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

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



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Informatique et Télécommunication

Présentée et soutenue par :

M. DORIN MARIAN RAUTU

le mardi 1 octobre 2019

Titre :

Déploiement temporaire d'une infrastructure de communication à base de drones

Ecole doctorale :

Mathématiques, Informatique, Télécommunications de Toulouse (MITT)

Unité de recherche :

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)

Directeur(s) de Thèse :

M. EMMANUEL CHAPUT

M. RIADH DHAOU

Rapporteurs :

M. BERTRAND DUCOURTHIAL, UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE

M. NADJIB ACHIR, UNIVERSITE PARIS 13

Membre(s) du jury :

Mme NATHALIE MITTON, INRIA VILLENEUVE D'ASCQ, Président

M. EMMANUEL CHAPUT, TOULOUSE INP, Membre

Mme CHRISTELLE CAILLOUET, UNIVERSITE DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS, Membre

M. RIADH DHAOU, TOULOUSE INP, Membre

REMERCIEMENTS

La route a été longue, mais on y est. Il est grand temps de remercier l'ensemble des personnes qui m'ont accompagné durant ce voyage, avec ou sans leur consentement.

D'ailleurs, le voyage n'aurait même jamais débuté sans mon directeur de thèse, Emmanuel CHAPUT, à qui je souhaite adresser mes premiers remerciements. Ta dévotion, ta persévérance et ton implication ont rendu cette aventure attirante. Merci pour cela, merci pour ta rigueur tout au long de cette thèse et surtout au moment de la rédaction de ce manuscrit. Tu as su astucieusement orienter mes recherches dans une direction pouvant donner suite à plein de pistes intéressantes. Dans le même esprit, je remercie également Riadh DHAOU, mon co-directeur de thèse, qui a toujours été disponible, pour ses relectures et avec qui j'ai pu avoir beaucoup de discussions très pédagogiques.

Je remercie par la suite les membres du jury, qui ont pris de leur temps pour évaluer ce travail. En particulier, je remercie Bertrand DUCOURTHIAL et Nadjib ACHIR d'avoir relu avec attention ce manuscrit. Merci à Nathalie MITTON et à Christelle CAILLOUET d'avoir apporté leur expertise à mes travaux.

Bien sûr, ce voyage aurait été très solitaire sans mes collègues de l'IRIT qui ont également beaucoup compté tout au long cette thèse. Je suis très content de les avoir croisés et je garde un souvenir particulier des moments passés à vos côtés. En particulier, je souhaite remercier Yoann, Elie, Oana et Adrien, avec qui j'ai commencé ce périple, ou presque. Ils ont toujours su me soutenir, m'accompagner, partager et être là, non seulement pour discuter du travail, mais aussi pour partager de fantastiques soirées ou week-ends. Parlant des soirées et des week-ends, je remercie également ceux qui ont commencé par être mes étudiants et qui ont fini par être mes amis. Romain et Thomas, pour lesquels je garde toujours une place;) et qui ont réussi à trouver leurs chemins, PJ et Guillaume, mes stagiaires

préférés, Raphaël, JF, Augustin, François, Pascal, etc. Toujours dans le même registre, je remercie André-Luc qui a su m'accompagner, m'encourager et pour ses compétences humaines et Julien avec qui j'ai eu l'occasion de partager plein de discussions intéressantes.

Je ne peux pas oublier de remercier mes autres collègues, passés : JGK, Éric, Hugo, Raphaël, ou encore en thèse : Amal, Mohammed, Kévin, Elene, Santiago, Cédric et Mouna, ou encore Justin et Youssouf. A votre tour maintenant, bon courage! Merci également aux permanents pour vos conseils : Katia, Béatrice, Gentian, Jérôme, Sandrine. Merci à SAM pour ta bonne humeur.

Pour conclure, des remerciements plus personnels, je remercie Mara, Vivien, Fabrice et tous mes amis de la CRf. Je remercie chaleureusement ma famille pour tout ce qu'ils m'apportent au quotidien. Bien sûr, à mes chers parents et ma sœur qui ont tout mis en œuvre pour que je réussisse, merci.

RÉSUMÉ

Historiquement, les avions sans pilote (ou Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)) ont été utilisés pour des tâches considérées comme dangereuses ou encore automatisables, comme la surveillance ou l'observation. Ils constituent aujourd'hui un outil essentiel pour de nombreuses applications, telles que les opérations de recherche et de sauvetage, la surveillance du trafic, la prévention et l'observation des incendies de forêt, ou le survol des zones hostiles à des fins de reconnaissance.

L'utilisation des UAVs n'est donc pas nouvelle. De tels véhicules ont été utilisés dès le XXe siècle, une panoplie de drones étant disponible pour accomplir ce type de mission. En revanche, au cours des dix dernières années, l'intérêt pour l'utilisation commerciale des UAVs a explosé. Avec les progrès de la technologie, l'utilisation des drones est en pleine expansion dans de multiples domaines, par exemple récemment la livraison des colis ou des repas.

Parallèlement à ce déploiement, les stations de base mobiles peuvent se voir dans l'incapacité de satisfaire les exigences de souplesse et de résilience des utilisateurs, surtout en cas d'événements imprévus, tels que les catastrophes naturelles, ou temporaires, comme les rassemblements ou les rencontres sportives. Une solution prometteuse consiste à profiter de la démocratisation des drones pour pallier les déficiences temporaires des réseaux cellulaires en les aidant à satisfaire les demandes par l'extension de la couverture à l'aide de points d'accès installés à bord des UAVs. Bien que les drones offrent un déploiement rapide en tant que stations de base aériennes, leur placement efficace devient l'un des problèmes clés.

Dans ce manuscrit, nous allons nous intéresser à ce type de réseaux et plus particulièrement au placement des drones en proposant une méthode de déploiement adaptée. Afin d'être le plus général possible, nous considérons que les positions exactes des utilisateurs peuvent ne pas être connues en avance avec précision, surtout quand la zone à couvrir est étendue. Nous allons nous intéresser à plusieurs

questions fondamentales : Est-ce que un tel type de déploiement peut être fait "à l'aveugle" ? Quel sera le taux de couverture atteint ? Est-ce que le déploiement peut s'adapter à la mobilité des utilisateurs ? Quelle est la durée de vie énergétique d'un tel réseau ? Comment la méthode de déploiement impacte la consommation électrique des drones ?

Pour répondre à ces questions nous allons tout d'abord étudier les méthodes de placement des points d'accès proposées dans la littérature. Un paramètre important des différents types de solutions est la connaissance de la position des utilisateurs sur laquelle on peut se fonder. Nous modélisons ensuite les positions des utilisateurs et nous introduisons la notion de point d'intérêt, représentant une zone où les utilisateurs sont plus susceptibles d'être présents. Puis, nous proposons une méthode d'auto-déploiement construite sur une analogie de la loi de Coulomb dans laquelle les utilisateurs et les UAVs agissent comme des charges électriques, les drones étant attirés par les utilisateurs. Notre proposition sera ensuite comparée à un modèle mathématique, offrant ainsi un optimum pour un scénario donné. Nos résultats montrent que notre proposition est tout à fait capable de couvrir efficacement des utilisateurs, sans connaître leurs positions exactes. De plus, en cas de déplacement des utilisateurs, les drones sont capables de les suivre pour garder une couverture acceptable.

ABSTRACT

Historically, UAVs have been used for tasks that are considered dangerous or automatable, such as surveillance, an essential aspect of many applications, such as search and rescue operations, traffic monitoring, forest fire monitoring, or overflight of hostile areas to conduct reconnaissance.

The use of UAVs is not new. Such vehicles have been used since the twentieth century, an array of drones being available to carry out this type of mission. On the other hand, over the last ten years, interest in the commercial use of UAVs has exploded. With advances in technology, the use of drones is booming in multiple areas, newly delivering parcels or meals.

Analogue to this deployment, the flexibility and resilience requirements of cellular networks are not always met by terrestrial base stations, especially in the case of unforeseen events, such as natural disasters, or temporary events like gatherings or sports events. One promising solution is to benefit from the availability of drones in order to fulfill the temporary failures of cellular networks by helping them to meet the demands by extending the coverage using the access points installed onboard the UAVs. Although the drones offer rapid deployment as aerial base stations, effective placement becomes one of the key issues.

In this thesis, we will focus on this type of network and especially on drone placement by proposing a suitable deployment method. In this case of scenarios, we consider that the exact positions of the users may not be known in advance, especially when the area to cover is large. We will study several questions : Can such a deployment be done "blindfolded" ? What will the coverage rate be ? Can the deployment adapt to user mobility ? What is the energy lifetime of the network ? How does the deployment method manage the power consumption of drones ?

To answer these questions, we will first study the placement methods of existing access points in the literature. We model user positions and introduce the concept

of point of interest, being an area where users are more likely to be present. Then, we propose a method of self-deployment built on an analogy of Coulomb's law in which the users and the UAVs act like electric charges, the drones being attracted by the users. Our proposal will then be compared with an analytical model, thus offering an optimum for a given scenario. Our results show that our proposal is quite capable of effectively covering users, without knowing their exact positions. In addition, in case of user mobility, the drones can follow them to keep an acceptable coverage.

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures	xi
Liste des tableaux	xiii
Glossaire	xv
1 Introduction	1
1.1 Scénario	4
1.2 Contributions et plan	8
2 État de l’art	11
2.1 Introduction	11
2.2 Caractérisation des méthodes	12
2.3 Revue des méthodes de placement	14
2.3.1 Les réseaux opérés de téléphonie	14
2.3.2 Les réseaux Wi-Fi avec infrastructure	17
2.3.3 Les réseaux de capteurs et sans infrastructure	19
2.3.4 Synthèse sur les méthodes de placement	25
2.4 Les algorithmes de routage dans les réseaux ad hoc	27
2.4.1 Le routage proactif	28
2.4.2 Le routage réactif	28
2.4.3 Le routage dit géographique	29
2.4.4 Le routage conscient de l’énergie	29
2.4.5 Application à notre contexte	30
2.5 Conclusions de l’état de l’art	31

3	Modélisation du problème	33
3.1	Introduction	33
3.2	Modélisation de la position des utilisateurs et des drones	34
3.2.1	Points d'intérêt	36
3.2.2	Modélisation des interactions entre les UAVs et les utilisateurs	40
3.3	Modélisation des conditions de communication	44
3.4	Modélisation du trafic réseau et la Qualité de Service (QoS)	48
3.5	Simulateurs et simulation	49
3.6	Modèle analytique	51
3.6.1	Équité	55
3.6.2	Présentation du solveur	57
4	Placement du réseau de drones - Contributions et résultats	61
4.1	Introduction	61
4.2	Placement initial	62
4.2.1	Influence de p	63
4.2.2	L'importance du point de départ	65
4.2.3	Conclusion	66
4.3	Prise en compte des interférences	67
4.3.1	L'impact des interférences	67
4.3.2	Le multi-canal	69
4.3.3	Le multi-canal dans <i>Placement Initial des Drones</i> (PID)	71
4.3.4	Analyse numérique du multi-canal	73
4.4	Comparaison avec l'optimal	74
4.4.1	Analyse des résultats	74
4.4.2	Amélioration de la couverture	76
4.4.3	Découverte étendue des utilisateurs	77
4.4.4	Performances de l'amélioration	79
4.4.5	Prise en compte du débit	82
4.5	Mobilité des utilisateurs	84
4.5.1	Les modèles de mobilité	85
4.5.2	PID face à la mobilité des utilisateurs	87
4.6	Synthèse	89

5	Routage et Énergie	93
5.1	Introduction	93
5.2	Considérations énergétiques	95
5.3	Remplacement d'un drone	100
5.4	Adaptation du routage	102
5.4.1	Analyse du remplacement sur le routage	102
5.5	Synthèse	105
6	Conclusions et perspectives	107
	Bibliographie	113

TABLE DES FIGURES

1.1	Exemples d'utilisation des cameras à bord des drones.	2
1.2	Un exemple de scénario étudié.	6
2.1	Schéma synthétique d'analyse des solutions de placement existantes.	13
2.2	Différence entre la couverture simple et multiple dans les Wireless Sensor Networks (WSNs).	21
2.3	Une représentation graphique de la loi de Coulomb.	26
3.1	Modélisation de la position des utilisateurs et des drones.	35
3.2	Exemple regroupement des utilisateurs.	36
3.3	Représentation du placement des utilisateurs autour des Points d'Intérêt (POIs) en fonction de leur attractivité.	37
3.4	Efficacité du modèle de placement des utilisateurs.	39
3.5	Interaction entre les drones et les utilisateurs.	42
3.6	Représentation complète du modèle proposé.	43
3.7	Représentation visuelle des trois modèles de couverture.	46
3.8	Comparaison de la couverture des modèles de placement.	56
3.9	Un modèle de grille de recherche appliqué à un exemple de placement.	60
4.1	Pourcentage d'utilisateurs associés au réseau en départ du centre de contrôle.	63
4.2	Placement initial des drones au départ du centre de contrôle $((0,0))$.	64
4.3	Pourcentage d'utilisateurs associés au réseau en variant le point de départ.	65
4.4	Pourcentage d'utilisateurs se situant sous la couverture de deux drones - conditions d'interférences.	68

4.5	Canaux Wi-Fi disponibles dans la bande fréquentielle 2,4 GHz.	69
4.6	Canaux Wi-Fi disponibles dans la bande fréquentielle 5 GHz.	70
4.7	Le partage de charge avec l'utilisation du multi-canal.	72
4.8	Pourcentage d'utilisateurs associés et non-interférés avec et sans plusieurs canaux Wi-Fi.	73
4.9	Comparaison du pourcentage d'utilisateurs associés entre le modèle PID-POI et une solution optimale OPTI-BINAIRE	75
4.10	Comparaison du placement des drones PID-POI et celui analytique OPTI-BINAIRE	76
4.11	Parcours de recherche des utilisateurs.	78
4.12	Comparaison entre une solution optimale OPTI-BINAIRE et notre modèle amélioré du pourcentage d'utilisateurs associés.	79
4.13	Représentation visuelle du placement des drones en utilisant OPTI-BINAIRE et PID-POI-BINAIRE sans et avec la recherche des utilisateurs.	80
4.14	Comparaison du pourcentage d'association entre PID-POI-PUISSANCE et PID-POI-PUISSANCE amélioré.	81
4.15	Comparaison du débit maximum offert aux utilisateurs entre le placement optimal OPTI-DEBIT et notre modèle PID-POI-DEBIT amélioré.	83
4.16	Comparaison du pourcentage d'association des utilisateurs entre le placement optimal OPTI-DEBIT et notre modèle PID-POI-DEBIT amélioré.	83
4.17	Comparaison de la couverture pour les solutions de suivi des utilisateurs en cas de mobilité.	88
5.1	Proportion de la consommation énergétique entre les mouvements dûs au vol et la communication.	97
5.2	Durée de vie moyenne et consommation énergétique d'un drone.	99
5.3	Scénario illustrant le remplacement d'un drone en fin de vie de la batterie.	101
5.4	L'intégration du drone de remplacement dans le réseau ad hoc.	101
5.5	Impact du remplacement d'un drone sur l'algorithme de routage dans le cas d'un appel <i>Voice over Internet Protocol</i> (VoIP) en cours.	103

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Récapitulatif des paramètres de la modélisation.	44
3.2	Exemple de schéma de modulation et de codage.	48
3.3	Temps de résolution du modèle "en escalier" en fonction de la taille de la grille de recherche.	59
4.1	Scénarios de test pour le modèle tenant compte du débit.	82
5.1	Paramètres du modèle énergétique.	96
5.2	Moyennes sur la durée de vie de la batterie et sur la consommation énergétique.	99

GLOSSAIRE

CPLEX Solveur générique pour différentes classes de problèmes d'optimisation, proposé par IBM ILOG. 57

AODV *Ad-hoc Ondemand Distance Vector* 28, 30, 31

CDMA *Code-division multiple access* 69

CPU *Central Processing Unit* 96

CSA *Channel Switch Announcement* 71, 72

D2D *Device to Device* 3

DFS *Dynamic Frequency Selection* 70

DSDV *Dynamic destination-Sequenced Distance-Vector* 28

DSR *Dynamic Source Routing* 28

DTN *Delay Tolerant Networks* 3, 22, 94, 100

FANET *Flying Ad-Hoc Network* 3, 50, 51

GSM *Global System for Mobile Communications* 14

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers* 17

IoT *Internet of Things* 2, 8, 48

ISM *Industrial, Scientific and Medical* 70

MANET *Mobile Ad-Hoc Network* 12, 27, 28, 30, 102

MCS *Modulation and coding scheme* 47, 54

MPR *MultiPoint Relay* 103, 104

- OFDMA** *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) 69
- OLSR** *Optimized Link State Routing* 28, 30, 31, 102–105
- PA** *Point d'Accès réseau* 4, 11, 12, 14–19, 25–27, 31, 38, 42, 45, 47, 69–72
- PF** *Proportional Fairness* 56
- PID** *Placement Initial des Drones* viii, 8, 9, 63, 64, 71, 74, 75, 77, 79, 82, 84, 87, 88, 90, 94, 96, 107–110
- POI** *Point d'Intérêt* xi, 36–39, 43, 44, 49, 62–64, 66, 67, 74–81, 87, 89–91, 108
- QoS** *Qualité de Service* viii, 34, 48, 49, 53
- TC** *Topology Control* 103, 104
- U-NII** *Unlicensed-National Information Infrastructure* 70
- UAV** *Unmanned Aerial Vehicle* iii–vi, viii, 1–3, 5–8, 24, 33, 40, 41, 43, 45, 49–52, 54, 55, 61–68, 71–73, 75, 77, 79–81, 84, 87–91, 94–96, 98–102, 104, 107–110, 123
- VoIP** *Voice over Internet Protocol* xii, 30, 48, 100, 103
- Wi-Fi** *Réseau local sans fil* xii, 5, 17–19, 25, 31, 41, 67, 69–71, 73, 96, 108
- WSN** *Wireless Sensor Network* xi, 12, 19–21, 35

INTRODUCTION

Les progrès technologiques ont permis la mise au point d'un nouveau type d'équipements, capables de voler de manière autonome, sans pilote à bord, pour des durées qui peuvent être conséquentes, accomplissant des missions militaires ou civiles comme la collecte des informations (capteurs de température, d'humidité, de pression) ou la surveillance (images, vidéo). Nous faisons référence aux Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) (aéronefs sans pilote). Le concept voit le jour aux débuts des années 1900 pendant la Première Guerre mondiale. À l'époque, les armées de certains pays impliqués envisageaient des moyens pour faire voler des avions sans présence humaine à bord pour limiter la perte des vies. Après la guerre, ce nouveau concept a encore germé dans l'esprit des scientifiques de l'armée, tout au long du XXème siècle cette technologie n'a pas cessé de s'améliorer. Au début des années 2010 ce domaine connaît une expansion impressionnante, les avancées permettant une introduction sur le marché commercial de plusieurs variantes de drones, certes moins grands et moins performants que leurs homologues militaires. En avril 2012, l'état français légifère pour la première fois sur l'utilisation de drones civils dans l'espace aérien [1].

Les UAVs sont désormais impliqués dans un grand nombre d'applications différentes. À commencer par les missions de reconnaissance militaire qui tirent parti des caméras installées à bord et de la mobilité des drones. L'armée n'est toutefois pas la seule à utiliser des drones pour faire de la surveillance. Dans le secteur civil [2], les drones sont aussi utilisés sur des zones auxquelles un être humain ne peut accéder que difficilement ou en se mettant en danger. La figure 1.1 illustre

de telles applications telles que la surveillance des incendies, des inondations, ou encore la prise de vue des zones dangereuses.



(a) Surveillance de la centrale Fukushima - 2011 ©AFP.



(b) Surveillance inondations dans le Jura - 2018 ©JuraDrone.



(c) Surveillance incendie cathédrale Notre Dame à Paris - 2019 ©Ministère de l'Intérieur.

FIGURE 1.1 Exemples d'utilisation des cameras à bord des drones.

Avec l'expansion rapide du marché des objets connectés, une opportunité qui nous semble intéressante est l'utilisation des drones pour la collecte des données de dispositifs *Internet of Things* (IoT) (villes intelligentes, systèmes médicaux, téléphones intelligents, véhicules ...). Dans les zones mal couvertes, les appareils IoT peuvent avoir des difficultés à envoyer des messages, car les contraintes énergétiques de l'appareil limitent la puissance de transmission. Ainsi, un UAV pourrait collecter des données des capteurs situés au sol [3–5]. Grâce aux communications en ligne de vue directe et à l'altitude variable, l'atténuation du signal peut être réduite et

la zone de couverture peut être augmentée.

D'autres applications peuvent être mentionnées, telles que l'utilisation de drones dans les parcs à thème ou des événements sportifs pour divertir le public, ou tirer parti des capacités de vol pour réaliser des modèles 3D d'une région [6]. Ces applications ne rencontrent pas forcément de difficultés du point de vue de la communication. Chaque drone pourrait être équipé d'un dispositif de stockage qui enregistre les informations pour un téléchargement ultérieur sur une station au sol. Ils peuvent être classés dans la catégorie *Delay Tolerant Networks* (DTN). La communauté scientifique a largement étudié ce type de réseaux [7].

En revanche, un nouveau type de réseau voit le jour, les Flying Ad-Hoc Networks (FANETs). L'utilisation des UAVs se développe également dans un large éventail d'applications réseau. En particulier, avec leurs qualités telles que la mobilité, l'altitude variable et la souplesse de déplacement, les drones concèdent plusieurs applications clés dans les réseaux sans fil. Compte tenu de ces caractéristiques, les réseaux de nouvelle génération peuvent intégrer des drones pour améliorer la qualité de service fournie et mettre en œuvre de nouvelles fonctionnalités [8]. Dans le cas des réseaux *Device to Device* (D2D), une solution efficace pour alléger les réseaux terrestres ou pallier leurs déficiences en les déchargeant d'une partie du trafic peut être offerte. Dans ce contexte, les drones peuvent offrir une plate-forme de diffusion rapide, comme suggéré dans [9] où les UAVs peuvent jouer un rôle majeur dans les réseaux de véhicules, car ils peuvent faciliter la diffusion de l'information en réduisant le nombre de liaisons nécessaires au niveau du sol.

De plus, prenons l'exemple d'une opération de recherche et de sauvetage, dans laquelle plusieurs drones sont déployés pour couvrir un périmètre donné [10], où les drones partageront des données pour adapter les modèles de recherche ou pour arrêter la mission de recherche si la cible était trouvée. Dans le même esprit, une flotte d'UAVs pourrait être déployée pour surveiller les catastrophes naturelles [11].

Cependant, les catastrophes naturelles, en plus des destructions matérielles dévastatrices, peuvent entraîner des perturbations massives de la communication car les réseaux de communication terrestres peuvent être endommagés ou détruits. Dans de tels cas, des communications fiables pour la sécurité publique sont nécessaires pour faciliter le déploiement des acteurs de la sécurité civile et les opérations de recherche et de sauvetage des victimes. L'utilisation de réseaux aériens fondés sur des drones peut être une solution prometteuse en termes de déploiement rapide,

de couverture élevée et de flexibilité. En outre, dans le cas des rassemblements publics, les réseaux terrestres peuvent être dépassés par la quantité d'utilisateurs à desservir sous la couverture des mêmes cellules, laissant souvent un vide dans la couverture des utilisateurs.

Afin de mettre en évidence les difficultés de mise en place et d'exploitation d'un réseau à même d'assurer de telles missions, nous présentons par la suite le scénario auquel nous allons nous intéresser tout au long de ce manuscrit.

1.1 Scénario

Notre objectif est de déployer un réseau ad hoc dans des situations particulières, telles qu'une catastrophe [12] ou manifestation publique qui regroupe un nombre significatif de personnes comme illustré dans la figure 1.2.

La destruction matérielle des infrastructures de communication est l'un des premiers impacts immédiats de toute catastrophe naturelle. Les infrastructures de télécommunication de téléphonie fixe ou mobile risquent d'être endommagées, ce qui perturbera les appels téléphoniques, l'accès à Internet et même potentiellement les réseaux de communication d'urgence. Lorsque les citoyens ont un besoin urgent de secours ou d'une intervention médicale, la communication est l'un des facteurs les plus importants pour leur survie. Pour les secours, il est presque impossible de localiser les personnes susceptibles d'être piégées ou blessées, et l'incapacité de se coordonner via des méthodes de communication standard complique encore les efforts de secours. La réparation des dégâts peut être extrêmement coûteuse pour les opérateurs et l'indisponibilité du service peut impacter les utilisateurs pour une durée conséquente.

En cas de grand rassemblement ou même en cas de catastrophe, les réseaux de communication sont souvent encombrés par un trafic de données exceptionnellement élevé, car les personnes sont regroupées dans un espace relativement restreint, couvert en général par un nombre limité de cellules. Ce trafic important, généralement beaucoup plus élevé que les ressources disponibles sur le *Point d'Accès réseau (PA)*, provient d'un nombre élevé d'appels et des transferts de photos et vidéos, dûs à l'expansion des réseaux sociaux.

En cas de surcharge, ce sont les points d'agrégation du trafic dans le réseau de cœur qui deviennent congestionnés. Cela se produit lorsque des données provenant

d'un certain nombre de sources arrivent au point de traitement et de décharge dans le réseau de cœur en créant des goulots d'étranglement. Lorsque ce phénomène apparaît, les communications peuvent être sévèrement limitées, voire totalement coupées, provoquant souvent une certaine frustration des usagers qui ne peuvent plus utiliser les services souscrits. De plus, ces goulots d'étranglement ne sont souvent découverts que lorsque la capacité maximale du réseau est atteinte. Il est alors trop tard pour résoudre le problème.

Les opérateurs de téléphonie mobile ont envisagé plusieurs solutions pour pallier la destruction ou l'incapacité temporaire d'une ou plusieurs cellules à couvrir le territoire. Des remorques peuvent être déployées, contenant des cellules mobiles autonomes appelées *Cellular on Wheels* capables de fournir une capacité supplémentaire ou rétablir les communications ou encore envoyer des générateurs électriques portables pour fournir une alimentation d'urgence. En revanche, ce type de solution présente le désavantage de nécessiter que la zone à couvrir soit accessible et présente alors un coût de déploiement élevé.

Durant ces travaux de recherche, nous nous sommes intéressés à un réseau de communication à la disposition des utilisateurs sur le terrain. Comme présenté, les progrès technologiques ont permis de rendre facile l'utilisation des drones dans des applications variées. Pour mettre en place ce réseau de communication nous utilisons ainsi une flotte d'UAVs comme dorsale pour la connectivité réseau.

De ce fait, nous considérons le déploiement d'un réseau sans fil de drones dans une situation telle que celles décrites précédemment. Ainsi, dans ce réseau, l'objectif serait de véhiculer du trafic varié provenant des utilisateurs. Par exemple, dans le contexte d'une catastrophe naturelle (tremblements de terre, incendies, catastrophes nucléaires, etc.), notre objectif sera de pouvoir proposer des services de communication aux secours ou aux forces de l'ordre, pour faciliter la coordination et l'intervention, ainsi qu'aux personnes sinistrées. Nous avons choisi de fonder ce réseau sur les drones et d'utiliser des équipements de communication qui ne nécessitent pas d'autorisations particulières, comme le Wi-Fi pour permettre à tout opérateur de créer son propre réseau prêt-à-l'emploi.

Indépendamment du scénario, nous imaginons que l'opérateur du réseau de drones installera un point de présence à proximité de la zone qu'il doit couvrir. Par exemple, dans le cas d'une catastrophe naturelle, naturellement, les intervenants de la sécurité civile installeront un poste de commandement qui sera en lieu sûr,

à proximité de la zone impactée, ou dans le cas d'un rassemblement de type manifestation sportive ou culturelle, les organisateurs mettront en place un centre de contrôle. Ainsi, nous considérons que le point de présence de l'opérateur du réseau sera co-localisé avec celui des organisateurs.

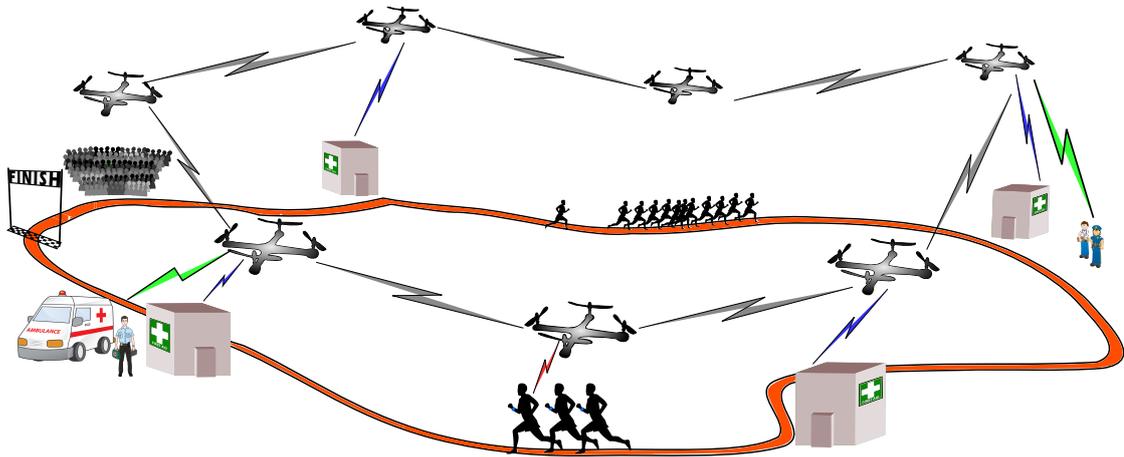


FIGURE 1.2 Un exemple de scénario étudié.

Pour une image plus détaillée du contexte, nous pouvons imaginer un "trail" dans un village de montagne, illustré à la figure 1.2. Il s'étend sur une zone assez vaste comportant plusieurs points de passage où sont situées les équipes d'intervention et où le réseau cellulaire n'offre pas de couverture conséquente des personnes présentes. Dans ce cas, il existe un besoin spécifique de communication que ce soit pour les équipes de secours ou pour le public. En outre, une forte demande de suivi de la progression des coureurs à chaque point de passage peut être envisagée.

En déployant ce réseau de drones, nous sommes en mesure de fournir un service de communication pour les personnes concernées. De plus, les UAVs pourront prendre des photos pour surveiller l'événement. Ces photos seront envoyées au centre de contrôle au sol via le réseau de drones. Des capteurs placés sur chaque coureur permettent, utilisant également les drones, d'identifier la position du coureur et l'état physique de chacun.

En outre, les drones peuvent collecter des informations à partir de capteurs qu'ils embarquent. Dans les airs, un UAV constitue le moyen idéal pour fournir un service particulier à un groupe de personnes ou d'appareils. Tout cela est possible grâce à sa maniabilité et à sa capacité à embarquer du matériel supplémentaire.

Ce réseau doit être rapide à déployer et à mettre en œuvre avec des équipements standards, de sorte que les acteurs de l'urgence ou un organisme privé puissent le développer et le mettre en place.

Il est alors clair qu'une des premières questions auxquelles on doit répondre est celle de positionnement des UAVs. En effet, la position d'un drone a des conséquences importantes. D'une part elle conditionne largement la couverture des utilisateurs, et donc la qualité d'expérience perçue. D'autre part, elle a également un impact fort sur la consommation énergétique du drone, qui doit atteindre l'emplacement voulu et s'y maintenir.

Au cours du scénario, les drones peuvent être amenés à se déplacer, par exemple pour assurer une continuité de service aux utilisateurs couverts, pour aller couvrir d'autres utilisateurs prioritaires, pour aller recharger leur batterie ou tout autre type de mission. La position initiale de chaque drone revêt en revanche un caractère particulier, puisqu'elle conditionne la qualité du service fourni et la consommation énergétique sur la totalité du scénario, surtout lorsque ce dernier est "peu dynamique".

Le but de nos travaux de recherche est alors le placement initial des UAVs formant ce réseau. Par conséquent, nous avons étudié un nouveau mécanisme d'auto-déploiement pour ce réseau de drones, capable de couvrir de nombreux utilisateurs, une des contributions de ce manuscrit. Nous supposons que dans un tel type de scénario les utilisateurs sont dispersés dans une zone donnée et peuvent se déplacer.

À cause de l'étendue de la zone à couvrir, les positions initiales exactes des utilisateurs ne peuvent pas être connues avec précision en avance pour planifier les positions des drones. Pour cette raison, nous pensons que les méthodes de placement utilisant la position des utilisateurs pour déterminer le placement ne conviennent pas à un tel scénario. En raison de leurs mouvements, les UAVs peuvent ne pas être en mesure de maintenir une connectivité permanente et, par conséquent, toute méthode centralisée semble difficile à mettre en place. En conséquence, nous tournons notre attention vers une méthode de placement distribuée, une de nos contributions sera l'utilisation des points d'intérêt dans ce type de réseau.

Il faut noter ici que le réseau a des caractéristiques très spécifiques :

1. Il s'agit d'un réseau temporaire, car il n'est déployé que lorsque cela est nécessaire. Le mécanisme de déploiement que nous proposons doit s'adapter

automatiquement à tout type de scénario.

2. Il doit être adapté au trafic hétérogène. Nous considérons diverses applications pouvant envoyer des données (capteurs IoT, caméras, appels audio ou vidéo, etc.).
3. La durée de vie des équipements est limitée, car la charge de la batterie du drone est un facteur important et les remplacements doivent alors être effectués sans interruption de service.
4. Les coûts de développement d'un tel réseau devront être abordables car il devrait être construit avec du matériel standard (UAV, antennes, ordinateurs de bord). Nous imaginons qu'il peut être utilisé par les organisateurs d'événements, la police, la sécurité civile, etc.

1.2 Contributions et plan

Dans cette thèse, nous nous intéressons au déploiement d'un tel type de réseau, fondée sur des drones et plus particulièrement au placement de ceux-ci en proposant une méthode de déploiement adaptée. Afin d'être le plus général possible, nous considérons que les positions exactes des utilisateurs ne peuvent pas être connues en avance, surtout quand la zone à couvrir est étendue. En revanche, des estimations sur les potentielles positions des utilisateurs peuvent être faites, nous proposons ainsi une méthode de modélisation des positions des utilisateurs fondée sur la notion de point d'intérêt, un élément clé du modèle de déploiement. Nous allons nous intéresser à plusieurs questions fondamentales : Est-ce qu'un tel type de déploiement peut être fait "à l'aveugle" ? Quel sera le taux de couverture atteint ? Est-ce que le déploiement peut s'adapter à la mobilité des utilisateurs ? Quelle est la durée de vie énergétique d'un tel réseau ? Comment la méthode de déploiement impacte la consommation électrique des drones ?

Pour y répondre, nous modélisons un mécanisme d'auto-déploiement des drones, appelé *Placement Initial des Drones* (PID), construit sur une analogie de la loi de Coulomb dans laquelle les utilisateurs et les UAVs agissent comme des charges électriques, les drones étant attirés par les utilisateurs. Notre proposition sera ensuite comparée avec un modèle mathématique, montrant un optimum pour un scénario donné. Notre étude et nos propositions sont organisées en 4 chapitres,

décrits ci-dessous.

Dans le chapitre 2, nous étudions les méthodes de placement des points d'accès proposées dans la littérature. L'étude sera faite en suivant deux axes principaux, la connaissance des positions et le type d'approche utilisé. Un paramètre important des différents types de solutions est la connaissance de la position des utilisateurs, ainsi deux classes se distinguent. L'approche fondée sur le modèle des forces virtuelles se démarque grâce à sa simplicité de fonctionnement, ce qui nous convainc de l'utiliser comme base dans le modèle de placement.

Le chapitre 3 introduit les différents modèles nécessaires dans le déploiement du réseau de drones. Premièrement, nous formulons le modèle de placement des utilisateurs. Celui-ci est fondé sur un paramètre d'entrée du système, la probabilité d'attractivité d'un point d'intérêt qui détermine le positionnement des utilisateurs pour chaque scénario de test. Ensuite, nous décrivons le modèle de déploiement des drones qui utilise une approche semblable à l'interaction des charges électriques pour matérialiser les interactions entre les drones et les utilisateurs. De plus, nous modélisons les conditions de communication entre les nœuds du réseau ainsi que le trafic et la qualité de service. Nous clôturerons ce chapitre en formulant analytiquement le problème de placement, modèle qui nous sert comme base dans l'évaluation des performances de PID.

Nous présentons, dans le chapitre 4, les résultats numériques du modèle de placement fondé sur les forces d'attraction et de répulsion, suivis d'une discussion sur la sensibilité de ce modèle à ses paramètres d'entrée et aux scénarios, ainsi qu'une comparaison avec les bornes supérieures données par la formulation analytique. Nous mettons en valeur la flexibilité du mécanisme de déploiement, car il est capable de se plier facilement aux contraintes imposées par tous les cas de figure dans lesquels nous souhaitons déployer le réseau de drones.

Enfin, dans le chapitre 5, nous examinons le comportement de PID quant à la consommation d'énergie. Nous introduisons un modèle de consommation énergétique des drones et nous constatons, sans surprise, que les drones devront être remplacés au cours de l'exploitation du réseau car la durée de vie du réseau est plus grande que les capacités des batteries. Ainsi, nous proposons une méthode de remplacement. Nous analysons l'impact de cette substitution sur les communications transitant par le réseau et nous apportons une amélioration au niveau du routage pour limiter les effets du remplacement.

ÉTAT DE L'ART

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons évoqué l'opportunité d'utiliser des drones afin de constituer une infrastructure de communication lors d'événements tels que des catastrophes naturelles ou des grands rassemblements. Rappelons que l'infrastructure de télécommunication peut être endommagée ou simplement saturée dans le cadre d'un tel scénario.

Un détail crucial dans la conception de ce type de réseau réside dans la méthode de placement des PAs¹. Définir l'emplacement des antennes ou des capteurs de données s'avère être un problème difficile. Elles doivent être placées judicieusement sur la zone à couvrir pour fournir un service de qualité à tous les usagers. La difficulté de placement des antennes provient du fait que des antennes émettant sur les mêmes fréquences interfèrent entre elles, provoquant des zones de couverture de formes irrégulières et une dégradation locale du service. De plus, les coûts du matériel ou de génie civil pour effectuer le placement sont généralement très élevés, le placement devra être fait en utilisant les moindres ressources.

Des nombreuses études ont été réalisées sur le placement **initial** des PAs dans différents domaines des réseaux de communications. Dans la suite de ce chapitre, nous détaillons les solutions proposées dans les réseaux avec infrastructure, comme

1. Dans la suite et sauf indication contraire, lorsque nous parlerons de PA, nous faisons référence à un équipement physique (en général une antenne) permettant de se connecter effectivement à un réseau hertzien, et non uniquement aux bornes *Wi-Fi*.

les réseaux de téléphonie mobile ou les réseaux *Wi-Fi*, ainsi que dans les réseaux ad hoc, comme les réseaux de collecte de données (réseaux de capteurs), Wireless Sensor Networks (WSNs) ou les réseaux ad hoc mobiles de type Mobile Ad-Hoc Networks (MANETs).

2.2 Caractérisation des méthodes

Pour que l'analyse des solutions existantes soit pertinente, les critères d'évaluation doivent être adaptés aux caractéristiques que la solution envisagée dans le chapitre précédent est tenue d'avoir. Ainsi, nous présenterons ici les principaux critères d'évaluation utilisés.

Nous allons nous intéresser en premier lieu à la connaissance que les solutions peuvent avoir sur la position des équipements terminaux à couvrir. Une solution *basée sur la position* utilise comme paramètre d'entrée du calcul l'emplacement des équipements terminaux à couvrir pour adapter la position des PAs. Nous pouvons considérer qu'une telle solution possède une connaissance parfaite des positions. A contrario, une contribution *indépendante de la position* n'a pas d'information exacte sur la position des terminaux.

Un deuxième critère de classement des solutions de placement prend en compte la capacité de déplacement des équipements terminaux à couvrir. Ainsi, nous qualifierons de *dynamiques* des contributions qui prennent en compte le déplacement des équipements terminaux pour adapter la couverture et en revanche les solutions seront dites *statiques* si le placement des PAs n'évolue pas avec le déplacement des équipements terminaux.

Le dernier critère principal d'analyse se réfère à l'architecture de traitement de l'information. Nous classerons les solutions en *centralisées*, si l'architecture rassemble les ressources/données nécessaires à un traitement sur un hôte central et à l'opposée *décentralisées*, si le traitement est effectué localement par les hôtes. À noter que dans le cas *décentralisé*, les données peuvent provenir de plusieurs hôtes, mais le calcul décisionnaire est effectué indépendamment par chaque hôte. Une synthèse graphique des critères d'analyse est fournie dans la figure 2.1.

L'objectif de nos travaux est de proposer une méthode de placement des drones, capable de s'adapter à une grande variété de scénarios. Pour cela, nous sommes convaincus qu'elle doit être indépendante de la position des utilisateurs, dynamique

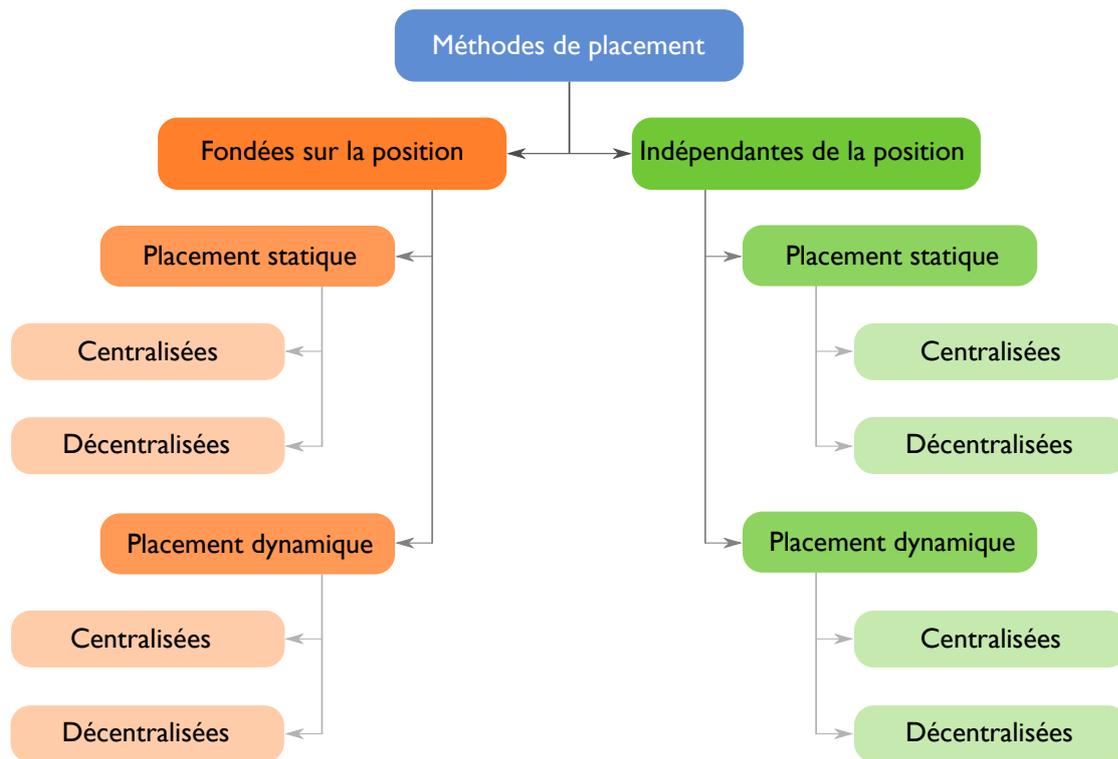


FIGURE 2.1 Schéma synthétique d'analyse des solutions de placement existantes.

et distribuée.

L'indépendance vis à vis de la connaissance de la position des utilisateurs provient du fait que dans de nombreux scénarios, cette information n'est pas disponible, par exemple dans les situations d'urgence, de surveillance d'une population, etc. Bien sûr, cela ne signifie pas qu'une telle information, si elle existe, ne doit pas être prise en compte. On peut ainsi imaginer que la position des utilisateurs soit découverte par les drones eux-mêmes lors de leur déploiement et qu'elle permette un positionnement plus efficace.

Le caractère dynamique d'un bon nombre de scénarios incite à définir un algorithme de placement, lui aussi, dynamique. Dès lors que les utilisateurs peuvent se déplacer, la position des drones doit être remise en question régulièrement.

Enfin, dans un cadre général, la connectivité réseau n'est pas assurée en permanence. Par exemple, lorsque les drones sont utilisés pour aller collecter des données de façon asynchrone, une connectivité permanente n'est pas pertinente. Il semble alors peu réaliste de mettre en place une technique purement centralisée dans

laquelle les drones doivent être en communication avec l'intelligence centrale qui définit leur positionnement.

2.3 Revue des méthodes de placement

Même si les premières communications sans fil sont apparues dans l'ère pré-industrielle avec des systèmes en ligne de vue directe qui utilisaient des signaux de fumée ou par des systèmes de drapeaux, ou encore le télégraphe sans fil apparu en début du XX^{ème} siècle, ce n'est qu'au début des années quatre-vingt que la recherche commence à s'orienter vers le placement, avec AT&T qui commence à s'intéresser au premier vrai service de téléphonie sans fil cellulaire [13]. Depuis ce moment, le placement des **PA**s a été longuement étudié, principalement porté au début par des recherches dans le contexte de la téléphonie mobile.

2.3.1 Les réseaux opérés de téléphonie

Dès l'apparition de la deuxième génération des réseaux cellulaires (*2G*), ou encore *Global System for Mobile Communications* (**GSM**) le placement des **PA**s est devenu crucial pour assurer une continuité des communications pour un usager qui se déplace. En revanche, dans les réseaux opérés, les positions des utilisateurs ne sont ni figées, ni connues en avance par les opérateurs. Le plan de déploiement des cellules doit alors prendre en compte des données venues des études démographiques. Ainsi, un opérateur peut construire un plan initial présentant la carte de couverture et détaillant le nombre de cellules nécessaires, l'emplacement idéal des **PA**s ainsi que le nombre de porteuses nécessaires.

Cependant, les contraintes de placement des **PA**s dans ce type de réseaux imposent souvent des adaptations sur la position des antennes [14]. En effet, la planification initiale offre une position approximative, la position exacte est souvent dépendante des spécificités du terrain. Plusieurs facteurs entrent donc en considération dans le placement effectif des **PA**s :

- **Accessibilité du site** : L'emplacement doit être facilement accessible pour le transport et pour le déchargement du matériel.
- **Superficie** : L'espace doit être suffisamment grand pour accommoder l'équipement technique ainsi que le mat de l'antenne.

- **Services disponibles** : Une telle installation doit être connectée au réseau électrique et au réseau de cœur de l'opérateur. Le raccordement à ces deux réseaux doit être facilement réalisable.
- **Espacement entre antennes** : En fonction de la puissance d'émission et de la fréquence utilisée un espacement minimum entre antennes doit être réalisé afin d'éviter les interférences inter-cellules.
- **Obstacles** : Même si les communications ne sont pas en ligne de vue, des considérations d'installation doivent être faites pour que l'antenne ne soit pas obstruée par l'environnement.

Au fil du temps les recherches dans le domaine des méthodes de placement ont progressé avec le développement des réseaux opérés. La question d'optimisation des positions des PAs s'est posée. De manière générale, le critère d'optimisation reste le même : augmenter la capacité des antennes et améliorer la qualité de service tout en diminuant le coût. Du point de vue de l'opérateur, cela revient à minimiser le nombre de PAs déployés pour réduire les coûts d'installation, de maintenance et de fonctionnement en les plaçant à des points dits optimaux pour assurer une couverture maximale de la zone en question.

Le premier article publié sur l'optimisation du placement des PAs remonte à 1994 [15]. Depuis, un grand nombre d'approches et de scénarios sont apparus dans la littérature. Bien que les approches exactes ne soient faisables que pour des problèmes de taille relativement petite, elles ont été appliquées dans ce contexte [16, 17]. Des algorithmes heuristiques déterministes ont été également proposés par divers auteurs. Cependant, les algorithmes méta-heuristiques fondés sur le recuit simulé, la recherche tabou et les algorithmes génétiques sont beaucoup plus populaires comme nous allons le voir ci-dessous.

Une mise en pratique de ce type d'optimisation a été proposée dans [18]. En partant d'un ensemble de "sites candidats", des possibles positions des PAs, et d'un ensemble de "points de test" (un point qui possède une certaine demande de trafic et une contrainte de qualité de service), un algorithme de maximisation de la couverture en minimisant les coûts est proposé. Puisque le problème de placement est considéré *NP-difficile* [19], les auteurs appliquent une meta-heuristique type recherche tabou. Cette technique de recherche utilise des méthodes de recherche locales. Les recherches locales prennent une solution potentielle à un problème et vérifient ses voisins immédiats (c'est-à-dire des solutions similaires à l'exception

de quelques détails mineurs) en essayant de trouver une meilleure solution. Si une solution a déjà été testée et si elle ne convient pas, elle sera appelée ainsi "tabou" afin que l'algorithme ne l'envisage plus. Ce type d'approche d'optimisation par heuristiques [20–26] et plus particulièrement des algorithmes génétiques [27–29] est également appliqué.

La popularité croissante de la téléphonie mobile et l'apparition de l'Internet sur les téléphones a forcé les opérateurs de ce type de réseaux et les institutions de standardisation envisager une densification des PAs pour satisfaire les demandes des utilisateurs. Plusieurs types ont été introduits afin d'augmenter la capacité en terme de nombre d'utilisateurs en réduisant la zone couverte.

Les macro-cellules sont les stations de base originales à grande puissance couvrant de larges zones de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Dans les zones urbaines, une couche supplémentaire de micro-cellules est installée pour fournir une capacité supplémentaire et pour pénétrer dans les bâtiments, réduisant ainsi la charge sur le réseau macro-cellulaire, couvrant des zones de plusieurs centaines de mètres. Des cellules plus petites appelées pico ou femto-cellules, couvrant quelques dizaines de mètres, sont utilisées pour les immeubles et les centres commerciaux où la demande est extrêmement élevée. Plusieurs articles de recherche se sont attaqués à l'optimisation du placement de ce type de cellules [26, 30–34].

Un tel type de déploiement reste centralisé et statique car la planification et le dimensionnement du réseau s'effectuent bien en amont et nécessitent un certain temps pour réaliser les différentes études de faisabilité. De plus, nous pouvons facilement observer que ces méthodes de placement sont parfaitement adaptées à un déploiement des réseaux où la densité des usagers à couvrir ne varie pas ou peu dans le temps. Dans notre cas, les positions des usagers peuvent changer fortement dans le temps forçant ainsi d'appliquer plusieurs fois l'algorithme d'optimisation dans un laps de temps assez réduit, ce qui ne pourra pas être faisable. De plus, les drones ne subissent pas de contraintes liées au génie civil et la communication avec les usagers s'effectue en ligne de vue directe. Pour ces raisons, il ne semble pas envisageable d'appliquer ce type de solutions pour effectuer le placement de nos PAs. Toutefois, des analyses de type études démographiques, comme celles effectuées pour les réseaux mobiles peuvent être intéressantes dans notre cas, pour guider le placement des drones.

2.3.2 Les réseaux Wi-Fi avec infrastructure

Le placement des PAs pour offrir une couverture adaptée n'est pas aussi crucial que dans les réseaux opérés de téléphonie sans fil. En 1997, le comité de travail sur les réseaux locaux 802 de l'*Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) publie le premier standard [35] de communications sans fil pour les réseaux locaux, connu aussi sous le nom commercial de Wi-Fi. Au début, le matériel sans fil coûtait si cher qu'il n'était utilisé que comme alternative au réseau local filaire dans les situations où le câblage était difficile, voire impossible. Au fil du temps, la baisse des prix des composants a entraîné une expansion très rapide du nombre d'équipements capables de se connecter à des réseaux locaux sans fil.

Initialement conçu pour les ordinateurs, le standard se voit aujourd'hui déployé sur tous les téléphones intelligents. Suite à la hausse du nombre des téléphones et la capacité et le coût de déploiement des réseaux cellulaires, les opérateurs s'intéressent à la mise en place des réseaux sans fil dans les zones agglomérées (centre commerciaux, stades, centres-villes) pour décharger le trafic qui transite dans le réseau de cœur des réseaux mobiles. De plus, les entreprises ou les écoles proposent ce type de service aux usagers pour faciliter le nomadisme des ordinateurs portables, tout en restant connectés au réseau interne et pour diminuer le coût de génie civil pour raccorder toutes les salles au réseau.

Du fait de l'utilisation des fréquences libres de licence et des limitations sur la puissance de transmission (limitée à 100 mW en Europe), le déploiement des cellules Wi-Fi s'avère complexe pour offrir une couverture satisfaisante d'une zone plus vaste. En utilisant des antennes omni-directionnelles et étant à l'intérieur des bâtiments, le diamètre des cellules Wi-Fi varie autour de 50m, conséquence de la puissance limitée et de la forte atténuation des fréquences.

Lors de la conception d'un réseau Wi-Fi, le problème le plus important consiste à déterminer où les PAs doivent être situés de manière à maximiser la couverture et le débit de la zone à couvrir. Plusieurs étapes, similaires à celles présentées précédemment dans le cas des réseaux cellulaires [36], sont nécessaires :

- **Estimation de la zone à couvrir** : Une étude d'obstacles et de densité d'utilisateurs, incluant les types de trafic susceptibles d'être véhiculés, devra être effectuée pour dimensionner le réseau.
- **Sélection des emplacements possibles pour les PAs** : Une liste de

positions potentielles des PAs devra être définie, car l'emplacement physique des PAs peut être contraint en raison de la connexion au réseau câblé, de l'alimentation électrique ou des coûts d'installation et d'administration.

- **Mesure du signal au point de test dans la zone à couvrir** : Afin de fournir une couverture et un débit maximum, le signal mesuré ou estimé à chaque point de test doit être supérieur au seuil avec lequel le débit minimum est garanti.
- **Décider la position sans prendre en compte l'interférence de canal** : En fonction de la zone à couvrir et des informations de mesure du signal, le meilleur emplacement pour les PAs est choisi afin de répondre à la demande de trafic et aux mesures de performance, au coût minimal.
- **Reconfiguration des PAs et des canaux avec les informations du terrain** : Après l'installation des PAs, des statistiques d'utilisation des PAs et des flux de trafic entrant/sortant par point d'accès sont collectées. Ensuite, de nouveaux PAs peuvent être installés dans les zones avec forte demande de trafic ou des PAs inutilisés peuvent être déplacés vers d'autres zones afin d'améliorer la couverture. De plus, l'attribution des canaux peut être reconfigurée pour éviter les interférences.

Des nombreuses recherches se sont intéressées, dès l'apparition du standard, au placement des PAs Wi-Fi pour optimiser la couverture, l'utilisation de la bande fréquentielle et le coût de déploiement. Un grand nombre de ces travaux, proposent des résolutions basées sur de l'optimisation linéaire en nombres entiers. Dans [37] les auteurs présentent des expériences sur le placement des PAs et le choix des fréquences. L'objectif de l'optimisation dans leur modèle linéaire en nombres entiers est la maximisation de la puissance du signal aux points de test. Dans ce cadre, [38] propose une méthode d'optimisation conjointe du placement des PAs et de l'attribution des canaux. L'objectif est de minimiser l'utilisation maximale du canal sur le réseau. D'autres approches [39–41] proposent des méthodes d'optimisation qui visent à minimiser le nombre des PAs. La première approche utilise une méthode tabou pour sélectionner les emplacements, les niveaux de puissance et les canaux des points d'accès. En revanche, le deuxième et le troisième article ont développé un algorithme de gradient discret [40] et un algorithme d'optimisation globale fondé sur la recherche locale [41] pour résoudre le problème.

D'autres études de recherche s'intéressent au même problème, mais en appliquant

des heuristiques [42–50]. Dans [51], les auteurs ont développé deux méthodes heuristiques, à savoir l’algorithme d’élagage et le recuit simulé pour résoudre le problème d’optimisation consistant à maximiser la zone de couverture et la qualité du signal, visant à maximiser la capacité du réseau. Dans [52, 53], les auteurs formulent le problème dans un ensemble quadratique et ils le résolvent en utilisant une heuristique gloutonne, tout comme dans [54], où les objectifs d’optimisation sont la couverture, la densité de trafic, les interférences et les coûts.

Comme dans le cas des réseaux cellulaires, la durée de vie d’une telle infrastructure est assez importante et la zone de couverture visée est assez large pour ne pas s’intéresser en détail à l’emplacement exact des utilisateurs. Des solutions de placement fondées sur des calculs centralisés et statiques comme l’optimisation ne sont pas souhaitables dans le cas du placement des drones auquel nous nous intéressons à cause de la durée nécessaire pour obtenir les résultats. Ce temps de mise en œuvre de l’algorithme interdit en particulier leur utilisation dans un contexte dynamique. De plus, ces solutions sont majoritairement centralisées et nécessitent donc une communication permanente entre tous les éléments du réseau. Même si elles sont plus rapides, les méthodes fondées sur des heuristiques souffrent des mêmes défauts. Néanmoins, la prise en compte des interférences qui ressort des mécanismes de déploiement des PAs Wi-Fi pourrait être une bonne considération à prendre en compte dans le placement des drones.

2.3.3 Les réseaux de capteurs et sans infrastructure

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) ont suscité beaucoup d’attention en raison de leur large gamme d’applications. Les WSN ouvrent une nouvelle classe de réseaux permettant une interaction distante avec l’environnement. Les potentielles applications comprennent la surveillance, la détection, le suivi, etc.

Le déploiement d’un WSN a pour but de collecter des données pour un traitement ultérieur. Ainsi, deux types de collecte seront possibles, à la demande ou déclenchée par un évènement. Il est souvent nécessaire d’assurer une couverture complète de la zone considérée lors du déploiement, en utilisant un nombre minimum de capteurs, [55]. Cette contrainte peut être satisfaite en assurant une couverture complète permanente ou en utilisant des capteurs mobiles qui assurent une couverture complète en parcourant l’ensemble de la zone. L’élément chargé de la collecte de

ces informations auprès des capteurs est appelé puits.

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour assurer un déploiement satisfaisant pour l'application :

- **La capacité de déplacement des nœuds** : Si les nœuds ne peuvent pas se déplacer, le seul déploiement possible est un déploiement assisté, par exemple à l'aide d'un robot, chargé de placer les capteurs. Sinon, chaque nœud est autonome pour se placer à la position indiquée.
- **La présence d'obstacles** : Aucun capteur ne doit être placé près d'un obstacle. Par conséquent, les obstacles doivent être détectés et un algorithme de contournement doit être utilisé dans la phase de déploiement pour prendre en compte les obstacles.
- **Le nombre de nœuds disponibles** : Il doit être préalablement choisi pour assurer une couverture adéquate en fonction des dimensions de la zone surveillée.
- **La topologie initiale** : Si la topologie initiale comprend plusieurs composantes déconnectées, les positions initiales de tous les capteurs doivent être connues en amont pour que l'algorithme de déploiement centralisé puisse calculer les positions finales de ces nœuds. Dans le cadre d'un déploiement distribué une étape de découverte de voisinage devra être mise en place pour permettre aux capteurs de découvrir rapidement d'autres composantes.
- **Orientation des antennes** : Même si les communications ne sont pas en ligne de vue, des considérations d'installation doivent être faites pour que l'antenne ne soit pas obstruée par l'environnement.

Parmi la panoplie des sujets de recherche dans ce domaine, deux problèmes intéressants liés au placement se posent. Comment placer les capteurs du réseau pour couvrir le plus de terrain possible ? Comment placer les puits pour couvrir le plus de capteurs possibles ? Par la suite, nous allons analyser quelques travaux de recherche représentatifs de ces pistes de recherche.

De manière générale, l'objectif du placement dans les réseaux WSNs est de couvrir l'ensemble de la zone. Selon les exigences de l'application, une couverture totale ou partielle est requise. Toutefois, si le nombre de capteurs n'est pas suffisant, une couverture complète ne peut être atteinte et l'objectif devient de maximiser le taux de couverture. En fonction de la sensibilité de l'application, une couverture totale peut être qualifiée de simple ou multiple. Dans la figure 2.2 les deux types

de couverture sont représentés visuellement.

Une couverture simple, figure 2.2.a, est nécessaire pour assurer une couverture complète de la zone considérée lors du déploiement d'un nombre minimal de nœuds. Cela peut être satisfait en couvrant chaque partie du terrain avec au moins un nœud de capteur. Les informations détectées à cet endroit doivent ensuite être transmises au puits. De nombreuses études visent à minimiser le nombre de nœuds déployés tout en assurant une couverture totale [56–58].

La couverture multiple, figure 2.2.b, peut être définie comme une extension de la couverture simple. En fonction des applications, telles que la surveillance ou des applications militaires, la défaillance d'un seul nœud peut entraîner la perte de données importantes. Ainsi, un seul capteur qui couvre une partie de la zone n'est pas suffisant pour ces applications. Pour assurer la tolérance aux pannes et permettre de prendre de bonnes décisions, un modèle de déploiement de k capteurs est défini, chaque partie de la zone est couverte par au moins k nœuds déployés. Les travaux de recherche visent ainsi à minimiser le nombre de capteurs utilisés tout en garantissant une couverture multiple [59–61].

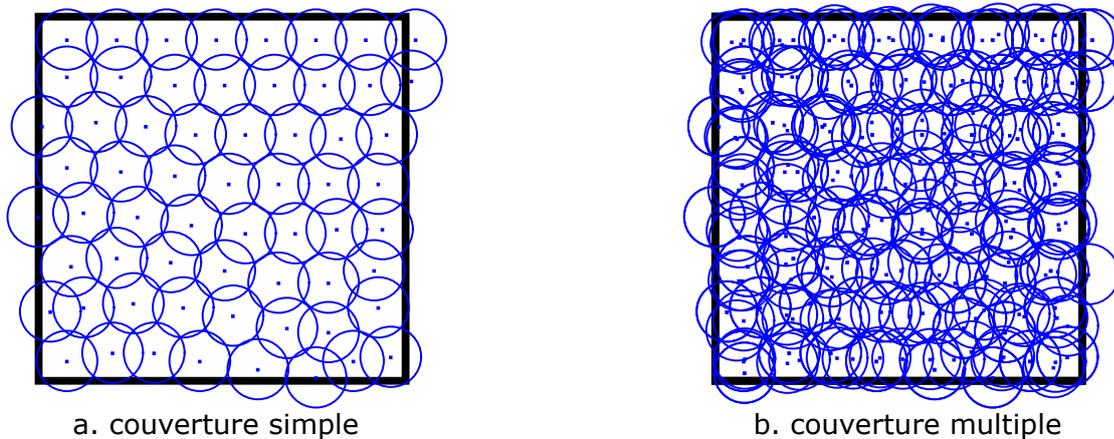


FIGURE 2.2 Différence entre la couverture simple et multiple dans les WSNs.

Pour surveiller une zone spécifique, il ne suffit pas d'assurer une couverture sans tenir compte de la connectivité. Lorsqu'un événement est détecté, il doit être relayé au puits. Par conséquent, il est nécessaire d'assurer la connectivité entre les nœuds et le récepteur afin de garantir le transfert d'informations. Il existe deux types de connectivité réseau : connectivité complète et connectivité intermittente.

Ainsi, pour surveiller efficacement une zone donnée, de nombreuses applications

nécessitent non seulement une couverture complète, mais également une connectivité complète afin de collecter des informations et de les rapporter. La connectivité complète se traduit par l'existence d'au moins un chemin entre n'importe quel nœud et le puits. Dans certaines applications, il n'est pas nécessaire d'assurer une connectivité complète dans la zone. Il suffit de garantir une connectivité intermittente en utilisant un récepteur mobile qui se déplace et collecte des informations à partir de nœuds déconnectés. Des techniques de type DTN peuvent alors être utilisées, [62].

Plusieurs types de stratégies de déploiement de capteurs ont été envisagées dans la littérature. La stratégie basée sur la grille fournit un déploiement déterministe dans lequel la position des nœuds est fixée selon un modèle de grille tel qu'un réseau triangulaire, une grille carrée, une grille hexagonale, ou fondée sur la géométrie algorithmique comme la triangulation de Delaunay ou les diagrammes de Voronoï. De plus, la zone est divisée en cellules virtuelles et en fonction de l'algorithme de déploiement utilisé, les capteurs sont situés soit aux sommets des cellules, soit au centre des cellules. La stratégie fondée sur les forces d'attraction est connue par son principe de déploiement simple. Ce principe est fondé sur des forces virtuelles pouvant être attractives, répulsives ou nulles. Nous allons analyser quelques propositions ci-dessous.

L'algorithme de déploiement C^2 proposé dans [63] est une stratégie fondée sur un réseau triangulaire. Les cellules hexagonales sont construites progressivement de manière distribuée par les capteurs. Cet algorithme se déroule en deux phases. Dans la première phase, le puits commence par construire sa cellule hexagonale et définit sa position en tant que centre de la cellule. La distance entre le centre de la cellule et un des sommets est deux fois plus grande que la distance entre deux centres de cellules voisins afin de maintenir la connectivité pendant le processus de déploiement. De plus, le récepteur détermine le centre de chaque cellule voisine et informe les nœuds de leur voisinage. Le capteur le plus proche du centre de sa cellule est sélectionné en tant que chef de sa cellule hexagonale. Il se déplace alors vers son centre de cellule. À leur tour, les nouveaux chefs de cellules définissent le centre de leurs cellules voisines et ainsi de suite. La deuxième phase a comme objectif d'améliorer la couverture totale en équilibrant le nombre de nœuds entre les cellules. Pour ce faire, si la différence entre les nœuds de deux cellules voisines est supérieure à 1, certains nœuds se déplaceront vers les cellules en déficit. Dans

cet algorithme de déploiement, une grille hexagonale est utilisée pour assurer une couverture complète et maintenir une connectivité complète. Il fonctionne bien lorsque le récepteur est situé au centre de la zone et que tous les nœuds sont regroupés autour du récepteur. D'autres travaux de recherche sont fondés sur des stratégies utilisant les grilles, [64–66], ou sur des stratégies impliquant la géométrie algorithmique, [67–69].

L'algorithme de forces virtuelles proposé dans [70] permet un déploiement centralisé pour améliorer un déploiement initial aléatoire. Lors du déploiement initial, tout nœud peut communiquer avec le récepteur en multi-sauts. Ensuite, le récepteur calcule la nouvelle position appropriée de chaque capteur en fonction des exigences de couverture et du mécanisme de forces. Dans ce travail, les obstacles exercent une force de répulsion et une zone de couverture préférentielle exerce une force attractive sur les capteurs. Pendant l'exécution de l'algorithme, les nœuds ne changent pas de position, ce n'est que lorsqu'ils reçoivent leurs positions finales qu'ils se dirigent directement vers eux. Il s'agit alors d'un algorithme centralisé qui offre un bon taux de couverture de la zone considérée tout en maintenant la connectivité du réseau. Cependant, une entité centrale doit connaître les positions initiales de tous les nœuds, calculer leurs positions finales et diffuser les positions à tous les capteurs. Ce principe est problématique lorsque la connectivité réseau n'est pas initialement garantie. De plus, lorsque le réseau est très dense, cet algorithme a de mauvaises performances.

Pour faire face au problème de passage à l'échelle, des versions distribuées de l'algorithme sont proposées dans la littérature. *IVFA*, algorithme de force virtuelle améliorée et *EVFA*, algorithme de force virtuelle exponentielle, sont deux algorithmes distribués proposés dans [71]. *EVFA* vise à accélérer la convergence car les forces augmentent de façon exponentielle avec la distance entre les capteurs. *IVFA* limite la portée des forces virtuelles : seuls les nœuds situés à portée radio d'un nœud donné exercent des forces virtuelles sur celui-ci. De plus, le problème d'empilement de capteurs est résolu en utilisant une très petite force attractive vers une zone à couvrir vis-à-vis de la force répulsive entre les capteurs. *IVFA* converge vers un état stable plus rapidement que l'algorithme initial et définit un mouvement maximal à chaque itération afin de réduire les déplacements inutiles et d'économiser de l'énergie. De plus, ce type d'approche a déjà été envisagé pour être utilisé sur des drones dans le cadre de la collecte des données [72]. Les zones

concernées par la collecte emettent une force positive attirant le drone vers elles. Des strategies de placement similaires ont été appliquées dans [73–76].

Dans [77–80] différentes heuristiques sont présentées pour le placement de points d'accès en utilisant des drones. Les auteurs de [77] cherchent à placer les drones en tant que répéteurs, en relayant des points d'accès aux utilisateurs. Le problème d'optimisation se traduit par une maximisation du débit de bout en bout ayant comme objectif de trouver la position optimale des drones entre les points d'accès et les utilisateurs. Dans [78], l'objectif est d'améliorer la couverture destinée aux services publics. Les points d'accès sont intégrés sur des drones, et par recherche par force brute, les UAVs sont placés à des positions où le rapport signal sur bruit des stations de base est faible. Connaissant les positions de l'utilisateur, ils ajustent l'emplacement des drones pour optimiser le débit du réseau. La même technique est utilisée dans [79] où les auteurs maximisent le rapport signal sur bruit en considérant les interférences dans le même canal dans un réseau d'accès fondé sur des drones. Dans [80], les heuristiques d'optimisation sont utilisées pour minimiser la puissance de transmission globale dans un réseau mobile couvrant des utilisateurs au sol. Même si les méthodes peuvent s'adapter au mouvement de l'utilisateur, le calcul doit toujours être effectué de manière centralisée.

D'autres méthodes de déploiement en utilisant des drones peuvent être trouvées dans la littérature. Les auteurs de [81] proposent de couvrir une zone donnée, modélisée comme un disque par l'utilisation de la théorie de compactage de cercle. L'objectif est de placer plusieurs points d'accès situés sur des drones afin que chaque rayon de couverture aide à remplir la zone. En adaptant la puissance de transmission, ils s'assurent que les cercles ne se chevauchent pas et ne créent donc pas d'interférences. Dans le but de minimiser le nombre de UAVs nécessaires pour couvrir un ensemble de capteurs, les auteurs de [82] proposent une méthode d'optimisation fondée sur la génération de colonnes, décomposée en deux sous-parties pour trouver le nombre minimal et la position des drones tout en assurant une connectivité avec une station de base.

Nous allons synthétiser par la suite les découvertes faites dans le domaine du placement. Le but est de déterminer les pistes les plus intéressantes pour répondre aux questions que nous nous posons dans le cadre du scénario préalablement défini.

2.3.4 Synthèse sur les méthodes de placement

Nous venons de décrire les principales méthodes de placement présentes dans la littérature en les abordant par la nature des réseaux impliqués. Pour cette synthèse, nous allons les classer en fonction de la nature de la solution mise en œuvre.

Comme nous l'avons dit au début du chapitre, trois grandes caractéristiques nous paraissent fondamentales pour une technique de placement initial. Nous cherchons à définir une solution qui soit indépendante de la position des utilisateurs, dynamique et décentralisée.

2.3.4.1 Les méthodes fondées sur l'optimisation

L'optimisation fournit une approche structurée pour maximiser ou minimiser une fonction objectif en déterminant les valeurs optimales des entrées à partir d'un ensemble de valeurs autorisées, les contraintes. Comme décrit dans ce chapitre, plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à assurer un placement optimal des PAs en appliquant différentes approches. Une telle méthode de déploiement est tout à fait adaptée aux réseaux cellulaires ou Wi-Fi car la disposition des usagers fluctue peu dans le temps. En revanche, dans notre cas, la position des utilisateurs varie dans le temps, imposant de ré-appliquer l'algorithme de placement optimal qui pourra être coûteux en temps. De ce fait, nous qualifions une telle approche de centralisée, statique, et fondée sur la connaissance a priori des positions des usagers, ainsi moins appropriée à nos objectifs. Nous y ferons pourtant appel afin de déterminer des optimums lorsque cela sera possible.

2.3.4.2 Les méthodes fondées sur des heuristiques

Une heuristique est une technique conçue pour résoudre un problème plus rapidement et permettre de trouver une solution approchée lorsque les méthodes classiques ne parviennent pas à trouver une solution exacte. Une heuristique est une fonction qui classe les choix dans les algorithmes de recherche, à chaque étape, une décision sur la prochaine étape à suivre sera prise, en fonction des informations disponibles. L'objectif d'une heuristique est de produire une solution acceptable dans un délai raisonnable pour résoudre le problème. Cette solution peut ne pas être la meilleure parmi toutes les solutions à ce problème, ou elle peut simplement

se rapprocher de la solution exacte.

Les méthodes de placement qui utilisent des algorithmes de recherche rapprochés peuvent être vues comme une alternative plus rapide aux algorithmes optimaux dans la recherche des positions des PAs. De manière générale, ce type de solution a besoin de connaître les position initiales des usagers pour produire l'emplacement des antennes.

2.3.4.3 Les méthodes fondées sur le modèle des forces

Une autre classe de solution à laquelle nous nous intéressons est inspirée par la loi de Coulomb. Pour rappel, la loi de Coulomb provient du domaine de la physique et permet de quantifier la force d'attraction ou de répulsion des particules chargées électriquement, définie dans l'équation 2.1, où $k_e \approx 9 \cdot 10^9$ représente la *constante de Coulomb*.

$$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

Imaginons deux charges électriques q_1 et q_2 . Si les deux charges ont le même signe, positif ou négatif, alors la force exercée entre les deux sera répulsive. Au contraire, si les deux charges ont des signes différents, alors les charges s'attirent. La particularité intéressante de cette loi vient du fait que la force est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges r . La figure 2.3 nous permet de mieux comprendre la loi de Coulomb.

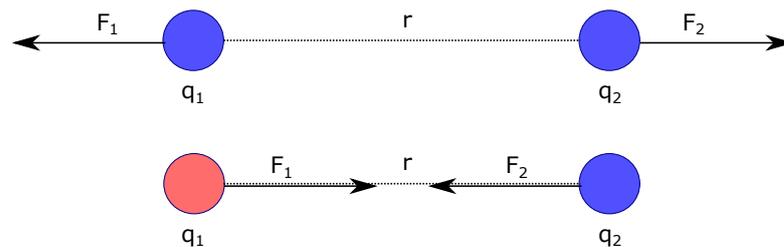


FIGURE 2.3 Une représentation graphique de la loi de Coulomb.

Dans la littérature, l'utilisation de la loi de Coulomb peut se traduire par un algorithme qui utilise des forces virtuelles pour réaliser le déploiement du réseau. En général, chaque PA se comporte comme une source de force pour tous les autres PAs à sa portée. La force exercée par un nœud dépend de la distance entre les

deux nœuds, permettant à une solution de déploiement de fonctionner en mode décentralisé. De manière générale, une force de répulsion est exercée entre deux PAs. La force d'attraction est exercée par exemple entre un PA et la cible à couvrir. L'intérêt d'un tel type de méthode de déploiement vient de la manière décentralisée de fonctionner et la prise en compte de la dynamique des cibles à couvrir. En fonction de la méthode utilisée pour mettre en œuvre ce mécanisme, il pourra également prendre en compte ou pas la position initiale des cibles.

2.3.4.4 Bilan sur les méthodes de placement

Nous l'avons dit, nous cherchons une méthode de placement la plus générique possible. Nous pensons que, pour cela, elle doit être à la fois *dynamique*, *distribuée* et *indépendante de la position* des utilisateurs. L'analyse de la littérature semble montrer qu'une telle solution idéale n'existe pas. Les solutions les plus prometteuses pour atteindre notre objectif semblent portées par des approches de type simulation de champs de forces. C'est donc dans cette direction que nous allons travailler.

Pour autant, des solutions fondées sur de l'optimisation ou même des heuristiques ne sont pas sans intérêt. Elle nous permettent en particulier d'exhiber, dans certaines situations, des bornes supérieures nous permettant de mieux évaluer l'impact de nos propositions.

2.4 Les algorithmes de routage dans les réseaux ad hoc

Reflétant la diversité des domaines d'application, les travaux de recherche ont proposé un large éventail de protocoles de routage pour les réseaux ad hoc. En général, les objectifs de ces protocoles sont les mêmes : maximiser le débit tout en minimisant les "erreurs d'aiguillage", le temps de traitement pour la mise en place et la consommation d'énergie. Cependant, les attentes liées au routage dans les réseaux ad hoc diffèrent généralement d'une application à l'autre et en fonction de l'architecture du réseau ad hoc. De nombreux protocoles de routage ont été développés pour les MANETs. Ils peuvent être classés en plusieurs types en fonction de l'algorithme utilisé, routage proactif, routage réactif, routage géographique ou le routage fondé sur l'énergie consommée.

2.4.1 Le routage proactif

Dans le cas du routage proactif, les nœuds évaluent en permanence les routes vers tous les nœuds accessibles et tentent de conserver des informations de routage cohérentes et à jour. Par conséquent, le nœud source peut obtenir immédiatement un chemin de routage s'il en a besoin. Dans les protocoles de routage proactifs, tous les nœuds doivent conserver une vue cohérente de la topologie du réseau. Lorsqu'un changement de topologie de réseau se produit, les mises à jour respectives doivent être propagées sur le réseau pour notifier le changement. La plupart des protocoles de routage proactifs proposés dans la littérature ont des propriétés héritées des algorithmes de routage utilisés dans les réseaux câblés, apportant des modifications à ceux-ci afin de s'adapter aux caractéristiques dynamiques des MANETs. Ainsi, les algorithmes de routage mettent à jour de manière proactive l'état des liens et maintiennent une route vers chaque destination possible, que le trafic de données existe ou non, l'*overhead* nécessaire pour conserver des informations de topologie de réseau à jour étant important. Deux exemples de protocoles proactifs sont *Dynamic destination-Sequenced Distance-Vector* (DSDV) [83] et *Optimized Link State Routing* (OLSR) [84], le plus répandu.

2.4.2 Le routage réactif

Une autre approche de routage dans les réseaux MANETs est celle dite réactive, appelée également "à la demande". Dans ce type d'algorithme de routage, la route est créée uniquement lorsque le nœud source le souhaite. Lorsqu'un nœud nécessite un routage vers une destination, il lance un processus de découverte de route au sein du réseau. Ce processus est terminé une fois qu'un itinéraire est trouvé ou que toutes les permutations possibles d'acheminement ont été examinées. Les routes actives peuvent être déconnectées en raison de la mobilité des nœuds dans les MANETs. Par conséquent, la maintenance de la route est une opération importante dans le cas des protocoles de routage réactifs. *Dynamic Source Routing* (DSR) [85] et *Ad-hoc Ondemand Distance Vector* (AODV) [86] sont deux exemples de protocoles de routage réactif. Par rapport aux protocoles de routage proactifs, la réduction de l'*overhead* est un avantage des protocoles de routage réactifs, mais en revanche, les protocoles de routage réactifs introduisent une latence non négligeable avant la distribution des messages due au fait qu'une route entre la source et la destination

doit être mise en place auparavant.

2.4.3 Le routage dit géographique

L'acheminement géographique repose sur la connaissance de l'émetteur de la position géographique de la destination. Un expéditeur utilisera ainsi l'emplacement géographique de la destination pour transmettre un message à la place de l'adresse réseau du destinataire pour effectuer le routage. Par conséquent, il n'est pas essentiel que l'expéditeur connaisse parfaitement la topologie du réseau, mais en revanche, il doit connaître les positions géographiques des destinations potentielles. De ce fait, le routage géographique suppose que chaque nœud connaisse son propre emplacement et que chaque source connaisse l'emplacement de sa destination.

Location-aided routing (LAR) [87] est un exemple de protocole qui utilise les informations de localisation pour minimiser l'espace de recherche nécessaire à la découverte d'une route vers la destination. Il a pour objectif de réduire les délais liés à la découverte de routes et utilise le GPS pour obtenir les informations de localisation d'un nœud. Une fois que le nœud source connaît l'emplacement du nœud destination et dispose également de certaines informations sur ses caractéristiques de mobilité, telles que la direction et la vitesse de déplacement du nœud destination, la source envoie des demandes de routage aux nœuds uniquement dans la zone où le nœud destination se trouve potentiellement. Si le nœud source ne dispose pas d'informations sur la vitesse et la direction du nœud de destination, l'ensemble du réseau est considéré comme une potentielle position du nœud destination. Plusieurs articles se sont attaqués au routage géographique, [88–90].

2.4.4 Le routage conscient de l'énergie

Comme nous l'avons déjà indiqué, les nœuds d'un réseau mobile ad hoc sont alimentés par des batteries. Par conséquent, la réduction de la consommation d'énergie de routage est un problème important. Les protocoles de routage traditionnels ont tendance à utiliser des algorithmes efficaces, mais sans tenir compte de la consommation d'énergie, ce qui entraîne souvent un épuisement rapide de l'énergie. Un protocole de routage sensible à la consommation répond aux problèmes liés à la consommation et à la conservation de l'énergie.

Online Energy Aware Routing [91] est une proposition d'algorithme de routage fondé sur l'énergie, introduisant des techniques combinatoires pour calculer des routes économes en énergie dans les MANETs. L'objectif est de choisir une route qui établit un équilibre entre l'énergie résiduelle, le niveau d'énergie minimal de chaque nœud sur le chemin et l'énergie consommée par le message en transit. Le réseau est considéré comme étant un graphe où les poids des arêtes représentent l'énergie requise pour la transmission. Les auteurs proposent tout d'abord une variante de l'algorithme de Dijkstra qui sera appliquée au graphe en cherchant les chemins avec l'énergie résiduelle minimale, plusieurs chemins pouvant satisfaire cette condition. Dans la seconde phase, l'algorithme choisit parmi ces chemins celui qui consomme le moins d'énergie.

Dans l'article [92], les auteurs ont proposé OLSR-EA, une amélioration de OLSR, en modifiant l'algorithme de calcul d'itinéraire de OLSR pour sélectionner des chemins en fonction d'un coût énergétique déterminé en combinant l'énergie résiduelle et la puissance de transmission consommée par chaque nœud. Cela a ensuite été exploité comme métrique de routage d'énergie en modifiant les messages de routage envoyés par OLSR. OLSR-EA permet de mieux prolonger la durée de vie du réseau et de mieux conserver l'énergie totale utilisée par rapport à OLSR. D'autres travaux notables proposent des méthodes de routage fondées sur la prise en compte de l'énergie [93–96].

2.4.5 Application à notre contexte

En terme de délais de mise en place des routes, on observe des valeurs plus élevées dans le cas des protocoles réactifs comme AODV, qui sont principalement liées à la découverte et aux mises à jour des routes utilisables. Par exemple, une étude [97] sur l'impact du routage pour le trafic *Voice over Internet Protocol* (VoIP) dans un réseau multi-sauts montre que le protocole OLSR est mieux adapté en raison d'un temps de routage plus court et de sa résilience face au déséquencement. Un autre avantage intrinsèque du fonctionnement des protocoles proactifs est le fait que la source ne connaît pas les routes complètes, mais elle possède uniquement les informations sur le prochain saut pour transférer les messages.

Un article publié par Kaur et al., [98] a présenté un cadre de comparaison des protocoles de routage MANET permettant de comparer le délai des protocoles AODV

et OLSR. L'étude a montré que le protocole AODV pouvait subir un retard important lors de l'établissement des routes. Dans le cas d'OLSR, il a montré que le délai est indépendant des profils de trafic, ayant donc une limite supérieure fixe pour le délai, quel que soit le trafic du réseau.

Les algorithmes dits géographiques posent un autre inconvénient lorsqu'ils sont utilisés dans un tel type de réseau. Pour un routage efficace, chaque nœud doit être tenu informé des positions (exactes ou approximatives) des autres pour "diriger" les paquets vers la destination. Cela implique une inondation du réseau avec des messages de mise à jour pour garder les tables de routage à jour, contrairement à OLSR où la mise à jour des tables de routage est plus facile. De plus, les informations de localisation peuvent ne pas être précises au moment où elles sont nécessaires, par conséquent, l'efficacité du réseau dépend de l'équilibre entre la répartition géographique et peut être soumise à des goulots d'étranglement.

2.5 Conclusions de l'état de l'art

Dans l'introduction de ce manuscrit, nous avons évoqué que notre proposition doit être polyvalente, dynamique, distribuée et indépendante de la position de l'utilisateur. Dans les scénarios envisagés, les utilisateurs sont capables de se déplacer, les communications entre les drones peuvent être intermittentes et une connaissance en temps réel de la position des utilisateurs est impossible. Pour ces raisons, les solutions d'optimisation demandent à la fois la position des utilisateurs à couvrir pour calculer le placement des drones et un temps de calcul qui peut être conséquent en fonction du nombre de variables en entrée. En revanche, une solution distribuée peut s'adapter facilement à nos besoins. Au vu de ces diverses contraintes d'implantation, nous pensons qu'une méthode fondée sur les forces virtuelles entre particules électriques, par analogie à la loi de Coulomb, est la plus adaptée. Même sans connaissance des positions des utilisateurs, ce mécanisme pourra être aidé par des informations théoriques, comme les études démographiques dans les réseaux cellulaires et devra prendre en compte les interférences inter-cellules, gérées lors du déploiement des PAs Wi-Fi.

De plus, pour les scénarios que nous envisageons, nous pensons qu'un protocole de routage proactif, tel qu'OLSR est plus adapté. Nous avons fait ce choix car le protocole OLSR est bien adapté aux applications qui ne sont pas tolérantes aux

longs délais dans la transmission des paquets, comme nous l'avons présenté dans la section précédente. La caractéristique proactive du protocole minimise le délai dans la transmission des paquets grâce à l'établissement des routes dès la mise en place du réseau. La réactivité aux modifications topologiques peut être ajustée en adaptant l'intervalle de diffusion des messages HELLO, en augmentant ainsi la prise en compte des changements rapides des routes entre les sources et les destinations.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les modèles que nous avons développés et qui sont à la base du réseau de communication fondé sur des drones que nous présentons dans ce manuscrit.

MODÉLISATION DU PROBLÈME

3.1 Introduction

Nous nous situons dans le contexte présenté dans le chapitre 1 où nous avons brièvement évoqué une architecture destinée à palier les perturbations des réseaux de télécommunication qu'une catastrophe naturelle ou les besoins qu'un grand rassemblement peut entraîner.

À travers ce chapitre, nous allons décrire plus formellement les modèles qui se trouvent à la base des travaux développés dans ce manuscrit. Dans la conception de ces modèles nous tenons compte des contraintes de déploiement des drones présentes dans le scénario. De plus, nous introduisons une de nos contributions, les points d'intérêt.

Le centre d'intérêt de nos travaux de recherche est le placement des drones. En partant du scénario et des caractéristiques du système, nous allons introduire les différentes modélisations nécessaires pour réaliser le placement des drones :

- La modélisation de la position des utilisateurs et des drones nous permet de définir la position des utilisateurs et les UAVs dans la zone de couverture. Les positions des utilisateurs seront par la suite considérées comme une entrée de nos modèles, tandis que la position des drones sera le rendu de ces modèles.
- La modélisation des interactions entre les UAVs et les utilisateurs représente un des piliers de notre contribution. Elle permettra le déploiement distribué

et dynamique des drones.

- La modélisation des conditions de communication définira comment les interactions entre les utilisateurs et les drones auront lieu.
- La modélisation du trafic réseau et la Qualité de Service (QoS) nous permettra d'introduire des contraintes sur les interactions et donc sur le déploiement.

De plus, un bref état de l'art sur les simulateurs réseau sera présenté dans ce chapitre, pour appuyer le choix que nous avons fait de concevoir et implanter notre propre simulateur qui répond aux contraintes imposées par le scénario et par le modèle de placement. Pour observer l'efficacité de notre simulateur, nous avons élaboré un modèle analytique du problème qui sera également présenté. Nous formulerons, enfin, une synthèse des métriques analysées pour évaluer notre proposition.

3.2 Modélisation de la position des utilisateurs et des drones

Comme nous avons mentionné précédemment, nous allons nous intéresser au placement des drones pour offrir une couverture à des utilisateurs se trouvant au sol. Dans ce sous-chapitre, nous allons développer la modélisation des positions des utilisateurs et des drones.

Nous représenterons la zone d'évolution des utilisateurs par un parallélépipède de longueur L , de largeur ℓ , et de hauteur h , représentant la zone à couvrir. Pour des soucis de simplification dans la représentation graphique, nous allons présenter cet espace en 2D, $L \times \ell$, figure 3.1.

Soit \mathcal{U} et \mathcal{D} l'ensemble des utilisateurs et respectivement des drones. Soit un utilisateur $\mathbb{U}_i \in \mathcal{U}$ avec $i \in [1, \mathbb{N}_U]$, où $\mathbb{N}_U = \text{card}(\mathcal{U})$ est le nombre d'utilisateurs. Chaque utilisateur $\mathbb{U}_i \in \mathcal{U}$ se situe à une position définie par $(x_{\mathbb{U}_i}, y_{\mathbb{U}_i}, h_{\mathbb{U}_i})$, où $x_{\mathbb{U}_i}$ et $y_{\mathbb{U}_i}$ représentent la position dans un plan en 2D et $h_{\mathbb{U}_i}$ donne l'altitude de l'utilisateur. Dans un souci de simplification, mais sans perte de généralité, nous supposons par la suite que tous les utilisateurs sont à la même altitude, arbitrairement fixée à 0. Nous aurons donc : $\forall \mathbb{U}_i \in \mathcal{U}, h_{\mathbb{U}_i} = 0$.

Quant aux drones, soit $\mathbb{D}_k \in \mathcal{D}$ un drone se situant à $(x_{\mathbb{D}_k}, y_{\mathbb{D}_k}, h_{\mathbb{D}_k})$, avec $k \in [1, \mathbb{N}_D]$ et $h_{\mathbb{D}_k}$ variable, où $\mathbb{N}_D = \text{card}(\mathcal{D})$. Chaque drone possède une zone

de communication. Nous modélisons cette zone par un disque au sol centré en $(x_{\mathbb{D}_k}, y_{\mathbb{D}_k})$ et de diamètre d (pour des soucis de simplicité, cette valeur est la même pour tous les drones). Cette zone est l'espace à l'intérieur duquel se situent les utilisateurs avec lesquels il peut interagir. Elle est donc directement liée à la portée de ses équipements de communication (forme d'antenne, puissance, etc.) et de son altitude $h_{\mathbb{D}_k}$. Nous nous intéressons ici uniquement aux communications avec des utilisateurs situés au sol. De plus, chaque drone possède aussi une portée de détection, notée π_a qui définit la zone à l'intérieur de laquelle les drones peuvent détecter la présence des utilisateurs.

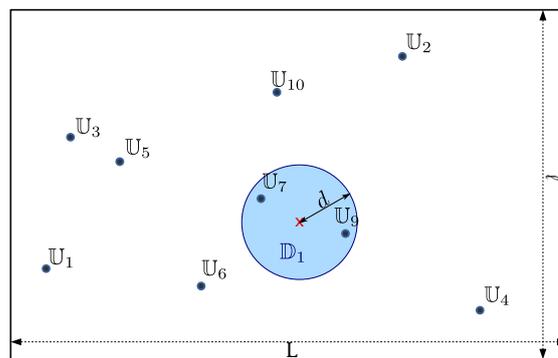


FIGURE 3.1 Modélisation de la position des utilisateurs et des drones.

Pour que le scénario présenté dans le chapitre 1.1 reste le plus général possible nous considérons que les positions des utilisateurs sont inconnues aux drones. Cette considération rend difficile l'application des solutions optimales ou heuristiques présentées dans le chapitre 2.3.4. Pour cette raison, nous ne pensons pas que les méthodes fondées sur la localisation pourraient être utilisées telles quelles. Les méthodes de placement exhaustives (couverture de la totalité de la zone) même si elle peuvent être applicables dans ce type de scénario, ont besoin d'un nombre conséquent de drones pour réaliser une couverture totale. Adéquates dans les réseaux WSN, où le prix d'un capteur est relativement faible, l'utilisation d'une telle méthode augmentera considérablement les coûts de déploiement du réseau que nous envisageons.

Dans un tel scénario, une solution pour le placement des drones pourra être le résultat d'une phase de découverte des utilisateurs. On imagine par exemple que les drones se déplacent (aléatoirement ou de façon déterministe) pour construire progressivement et de façon collaborative une carte des utilisateurs, qui pourra alors

être utilisée par une méthode optimale. Une telle technique présente cependant des difficultés, telles que le temps et l'énergie nécessaires, ou encore l'inadéquation à un scénario avec des utilisateurs mobiles.

Cependant, les utilisateurs sont rarement répartis de manière complètement uniforme, figure 3.2. Ils se retrouvent plus ou moins regroupés autour des zones d'intérêt. Par conséquent, des estimations sur la position potentielle des utilisateurs peuvent être faites. Pour cela, nous introduisons une de nos contributions, les Points d'Intérêt (POIs).

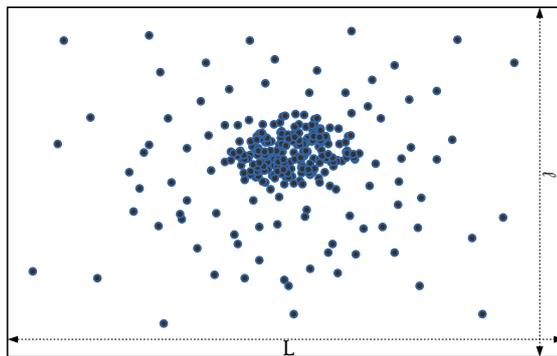


FIGURE 3.2 Exemple regroupement des utilisateurs.

3.2.1 Points d'intérêt

Nous considérons qu'avoir des informations précises sur la position des utilisateurs n'est pas envisageable, sauf si un repérage continu de la zone à couvrir est fait pour identifier les utilisateurs, car leur mobilité rendra obsolète un repérage sporadique. Même si la position réelle de chaque utilisateur ne peut pas être connue, nous pouvons disposer de certaines informations qui pourront nous aider à déterminer les zones où la probabilité de trouver des utilisateurs est élevée. Ces informations peuvent provenir des études démographiques réalisées, par exemple par les opérateurs de téléphonie, ou ces zones de rassemblement peuvent être imaginées autour de points spécifiques en fonction du scénario. Nous introduisons ainsi une de nos contributions, la notion de POIs. Selon le cas étudié, un point d'intérêt peut être défini par n'importe quel endroit spécial (centre de commandement en cas d'urgence, point de restauration lors d'une manifestation, lieux de sécurité lors d'un accident, etc.).

Les utilisateurs sont donc censés être proches des points d'intérêt. La position d'un utilisateur particulier n'est pas connue, mais la position bien connue du POI fournit des informations statistiques sur les positions des utilisateurs. Nous ne faisons ici aucune hypothèse sur la position des points d'intérêt, \mathbb{P}_j , $j \in [1, \mathbb{N}_P]$. Dans nos simulations, nous les positionnons à l'aide d'une loi uniforme. Bien entendu, en fonction du scénario, des distributions plus appropriées pourraient être utilisées.

Nous considérons ainsi que les positions des utilisateurs sont fortement liées à l'emplacement des POIs. Nous envisageons alors que chaque utilisateur est associé à un point d'intérêt spécifique et nous appliquons un modèle simple, mais efficace, pour déterminer les positions des utilisateurs.

Les utilisateurs sont répartis aléatoirement sur les \mathbb{N}_P POIs selon une probabilité discrète dont les poids modélisent l'importance relative des points d'intérêt (ainsi une loi uniforme décrira des POIs équivalents).

Un utilisateur \mathbb{U}_i peut se trouver plus ou moins proche du point d'intérêt auquel il est associé. En fonction du scénario envisagé, nous pouvons imaginer des groupes d'utilisateurs plus concentrés dans les zones d'intérêt, ou plus dispersés dans le périmètre à couvrir. Par conséquent, pour faire apparaître cette variance dans la concentration des utilisateurs autour des points d'intérêt, nous introduisons la notion d'attractivité, que les POIs exercent sur les utilisateurs. Elle sera exprimée à travers une probabilité p . Ainsi, nous avons considéré que la distance entre l'utilisateur et le point d'intérêt suit une loi normale de moyenne 0 et d'écart type σ , où σ est calculé en fonction de p . La position angulaire de l'utilisateur sera choisie aléatoirement selon une loi uniforme sur $[0, 2\pi]$.

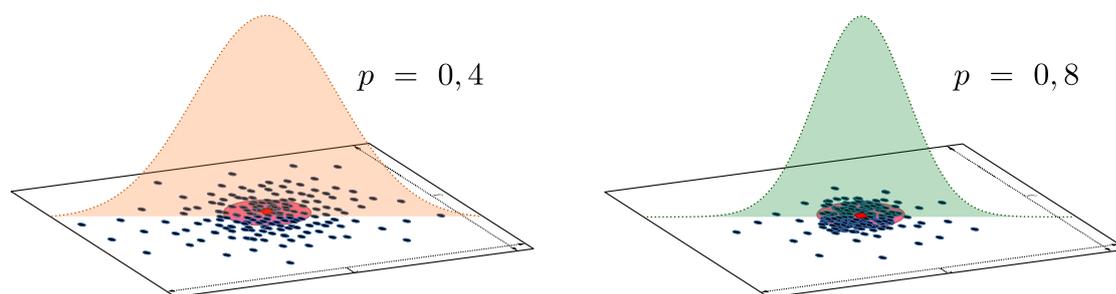


FIGURE 3.3 Représentation du placement des utilisateurs autour des POIs en fonction de leur attractivité.

Dans la figure 3.3, nous avons représenté le placement des utilisateurs en fonction de l'attractivité, exprimée à travers deux valeurs de la probabilité p , courbe orange et verte. Le disque rouge symbolise la zone d'attraction du POI, c'est-à-dire celle où se trouve tous les utilisateurs si $p = 1$, tandis que le point rouge symbolise le centre du point d'intérêt. Pour une attractivité forte, $p = 1$, les utilisateurs sont censés se trouver à l'intérieur de ce disque. Pour des soucis de simplification, nous avons arbitrairement choisi de considérer que la zone de communication et la portée de détection d'un drone ainsi que la zone d'attraction d'un POI ont le même diamètre d .

Nous pouvons facilement observer que le placement des utilisateurs se fait en suivant la densité de probabilité, ϕ montrée sur la figure, pour laquelle l'écart type est calculé en fonction de la probabilité p . Nous devons donc calculer l'écart type en fonction de p (qui est la caractéristique visée de notre point d'intérêt).

Nous obtenons facilement la valeur de l'écart type de la loi normale en fonction de la probabilité d'attractivité. Soit ϕ la densité de probabilité de la loi normale $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$ (3.1), obtenant ainsi la probabilité (3.2) que la position de l'utilisateur se trouve à une distance d du centre du point d'intérêt, donc dans la zone rouge évoquée ci-dessus. Cette distance peut être, par exemple, égale au diamètre de couverture d'un PA. L'intégrale ainsi obtenue sur le domaine $[-d, d]$ est égale à deux fois l'intégrale sur le domaine $[0, d]$, la densité de probabilité de la loi normale étant symétrique autour de la moyenne, dans notre cas 0, (3.3). En effectuant le changement de variable (3.4) et en passant à la fonction d'erreur de Gauss (3.6) (3.7) nous obtenons facilement une équation nous permettant de déterminer la valeur de l'écart type en fonction de la probabilité, p , du POI, (3.8). p influence donc à l'aide de σ la largeur de la cloche de la loi normale, jouant ainsi sur la répartition des utilisateurs.

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

$$p[X \in [-d, d]] = \int_{-d}^d \phi(x) dx \quad (3.2)$$

$$\int_{-d}^d \phi(x) dx = \int_{-d}^0 \phi(x) dx \cdot \int_0^d \phi(x) dx = 2 \cdot \int_0^d \phi(x) dx \quad (3.3)$$

$$u = \frac{x}{\sqrt{2}\sigma}; du = \frac{dx}{\sqrt{2}\sigma} \quad (3.4)$$

$$u(0) = \frac{0}{\sqrt{2}\sigma} = 0; u(d) = \frac{d}{\sqrt{2}\sigma} = d' \quad (3.5)$$

$$p[X \in [-d, d]] = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{d'} \exp(-u^2) du \quad (3.6)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.7)$$

$$p[X \in [-d, d]] = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{d'} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) du \quad (3.8)$$

$$p[X \in [-d, d]] = \frac{2\sqrt{2\pi}}{2\sqrt{2\pi}} \cdot \operatorname{erf}(d') = \operatorname{erf}\left(\frac{d}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (3.8)$$

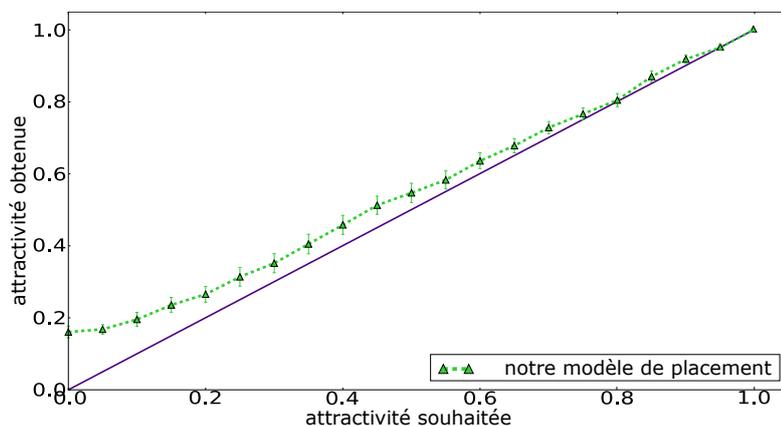


FIGURE 3.4 Efficacité du modèle de placement des utilisateurs.

Par la suite, nous avons évalué l'efficacité du modèle de placement proposé. Pour ce faire, nous analysons la proportion d'utilisateurs se trouvant à une distance inférieure à d du centre du point d'intérêt. Cette évaluation, figure 3.4, a été effectuée en variant l'attractivité des POIs. Nous pouvons remarquer certaines variations entre l'attractivité souhaitée et le résultat obtenu, cet impact étant plus significatif pour des petites valeurs de p . Après analyse de ces fluctuations, nous avons identifié deux principales causes :

- L'espace dans lequel les utilisateurs sont placés est fini.
- Un utilisateur peut être éloigné de son point d'intérêt mais proche d'un autre.

Pour de faibles valeurs d'attractivité (entraînant une distribution quasi-uniforme des utilisateurs) et pour un nombre conséquent d'utilisateurs, la taille de l'espace est importante pour garantir l'uniformité dans le placement, sinon les positions choisies seront proches d'un point d'intérêt, pas nécessairement celui auquel l'utilisateur a été associé.

3.2.2 Modélisation des interactions entre les UAVs et les utilisateurs

Comme précédemment évoqué, le positionnement des drones doit résulter d'un processus de décision qui doit pouvoir fonctionner avec un réseau non connexe et sans connaissance (précise) de la position des utilisateurs (qui peuvent bouger). En conséquence, il semble évident qu'une telle solution doit être dynamique et distribuée, chaque drone agissant de façon autonome.

Indépendamment de la stratégie proposée, il apparaît donc important d'intégrer dans la modélisation les interactions entre les drones et leur environnement. Nous souhaitons que la solution proposée reste relativement accessible en terme de coût de mise en place. De plus, pour réduire le nombre d'aéronefs au minimum, chacun devra couvrir autant d'utilisateurs que possible. Nous utiliserons les points d'intérêt, voir chapitre 3.2.1, comme information a priori sur les potentiels endroits où des utilisateurs pourraient être trouvés. La mobilité de ces derniers impose que notre solution soit souple et dynamique, étant capable de s'auto-configurer pour couvrir en permanence le maximum d'utilisateurs possible. De plus, les drones qui utilisent le même canal de communication risquent d'interférer, si bien qu'il sera nécessaire de les maintenir à une distance suffisante pour préserver l'effet de capture. Au vu de ces diverses contraintes d'implantation, nous proposons ainsi notre modèle de placement des drones, pour couvrir les utilisateurs, fondé sur les forces électromagnétiques, par analogie à la loi d'interaction des particules chargées électriquement de Coulomb, comme présenté dans le chapitre 2.

Nous voulons positionner les drones, \mathbb{D}_k , comme points d'accès au-dessus d'un grand nombre d'utilisateurs placés aléatoirement, suivant le modèle décrit auparavant, dans une zone définie. Les UAVs sont donc supposés se rapprocher le plus possible d'un nombre maximal d'utilisateurs. Pour ce faire, un drone \mathbb{D}_k est défini dans notre modèle comme une charge négative et un utilisateur \mathbb{U}_i représente une

charge positive. Ainsi, les drones seront attirés par les utilisateurs. Les drones étant des charges négatives, ils seront repoussés si jamais ils se retrouvent à un seuil d , la zone de communication, permettant d'assurer les communications entre chaque drone et ses utilisateurs, sans subir les interférences d'un autre drone utilisant le même canal. Nous évitons ainsi que plusieurs drones s'agglomèrent au dessus des mêmes utilisateurs, ce qui serait contreproductif, à cause des interférences. Évidemment, si le nombre d'utilisateurs dans un attroupement est important, celui-ci exercera une force d'attraction supérieure à la force de répulsion entre les drones, permettant à plusieurs UAVs de couvrir la même zone, ou dans le cas où un drone est connecté à un grand nombre d'utilisateurs et qu'un autre drone traverse sa zone de communication, le premier restera statique, seul le drone intrusif sera repoussé. La valeur de cette force est donc calculée à l'aide d'une loi inspirée de la loi de Coulomb, voir équation (2.1), son signe indiquant s'il s'agit d'une force de répulsion ou d'attraction.

Notre modèle peut être adapté à n'importe quelle technologie physique sans fil, le "champ électrique" émis par les charges étant déduit en fonction de la puissance du signal ou sur les messages de contrôle d'accès au support, tels que les balises Wi-Fi, par exemple. En modifiant la valeur de la charge attribuée à chaque utilisateur, nous pouvons les hiérarchiser par type de service demandé ou par l'importance du rôle en fonction du scénario, permettant une couverture prioritaire.

Bien sûr, il existe cependant de nombreuses différences fondamentales avec la loi de Coulomb. En partant des objectifs que nous avons fixés pour notre modèle, nous devons imposer des contraintes sur celui-ci.

- Un utilisateur \mathbb{U}_i ne doit pas être repoussé par un utilisateur \mathbb{U}_j . Ainsi, il n'y a pas d'interaction entre les charges positives (*les utilisateurs*) dans notre modèle.
- Nous voulons qu'un drone \mathbb{D}_k se déplace vers un utilisateur \mathbb{U}_i , mais ce dernier est libre de se déplacer sans aucune contrainte et n'est donc pas attiré par les UAVs, les charges positives ne sont pas attirées par des charges négatives.
- Nous considérons que les drones ne peuvent pas dépister des utilisateurs à une distance infinie, ainsi dans notre modèle, les interactions ont une portée π_a , la portée de détection.

La portée de la force d'attraction π_a est un paramètre important dans la

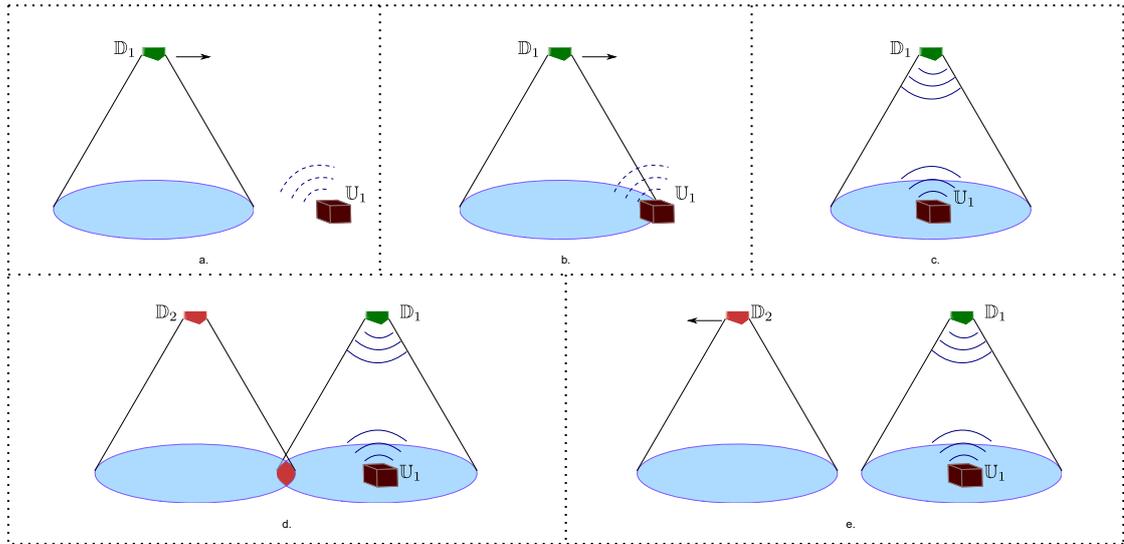


FIGURE 3.5 Interaction entre les drones et les utilisateurs.

modélisation. Il permet de diversifier l'application du modèle sur des scénarios plus généraux, en faisant varier sa valeur, une idée simple est par exemple d'utiliser la même valeur que pour la zone de communication d .

Nous pouvons imaginer un cas d'application où les positions des utilisateurs sont connues, $\pi_a = \infty$. De plus, il permet d'adapter le comportement des drones en fonction du choix technologique des PAs. Sa valeur peut être adaptée pour égaler la portée des points d'accès utilisés.

Se pose alors la question de la mise en œuvre. Bien sûr, les drones et les utilisateurs n'ont pas d'interactions comparables à celles de notre modèle. Il est donc nécessaire, si l'on souhaite l'implanter, de trouver des techniques nous permettant de les imiter. Une idée simple se fonde sur les communications : deux éléments interagissent s'ils peuvent communiquer.

Pour une meilleure compréhension des interactions entre les drones et entre les drones et les utilisateurs, la figure 3.5 reprend quelques étapes clés de notre modèle de placement. L'utilisateur \mathbb{U}_1 émet des messages à des intervalles réguliers grâce à son support de communication, imitant ainsi le champ électromagnétique émis par une charge électrique (3.5.a). Un drone \mathbb{D}_1 étant en déplacement, détecte la présence de l'utilisateur au moment où ce dernier rentre dans la zone de communication du drone, cercle bleu, (3.5.b), les deux charges électriques, positive et négative, s'attirent.

Ainsi, l'UAV se positionne au dessus de l'utilisateur pour assurer une couverture réseau, (3.5.c). Un drone \mathbb{D}_2 étant à la recherche des utilisateurs à couvrir, se rapproche de \mathbb{D}_1 . Comme dans notre modèle les deux UAVs détiennent une charge de même signe, le deuxième drone sera repoussé par le premier, les deux zones de communication s'intersectent sur la zone rouge, (3.5.d). En fonction du scénario, la valeur des charges peut être adaptée pour répondre à des besoins spécifiques. Dans l'exemple présenté, la charge électrique d'un utilisateur étant supérieure à la charge d'un UAV, la force de répulsion exercée par \mathbb{D}_2 sur \mathbb{D}_1 est inférieure à la force d'attraction exercée sur ce dernier par \mathbb{U}_1 , seul \mathbb{D}_2 se déplacera dans le sens opposé, (3.5.e).

3.2.2.1 Synthèse

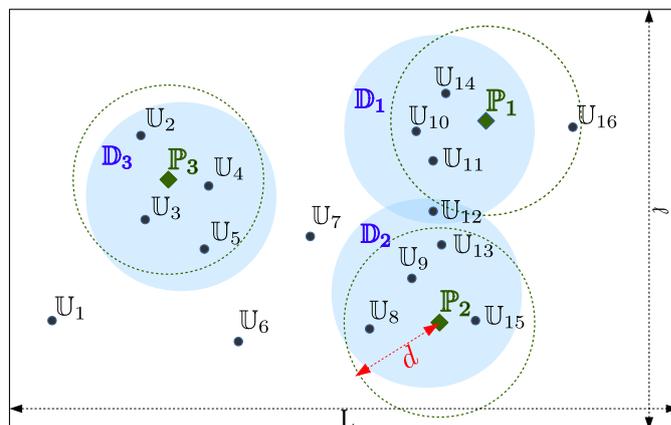


FIGURE 3.6 Représentation complète du modèle proposé.

Le modèle que nous proposons est représenté dans la figure 3.6. Un nombre N_U d'utilisateurs sont placés de manière aléatoire dans une zone rectangulaire ($N_U = 16$), étant répartis entre $N_P = 3$ POIs, chacun ayant un poids équivalent et une attractivité déterminée par la probabilité $p = 0.75$. Sur cette figure, la distance d en partant du centre du POI est équivalente à la zone de communication, (d) d'un drone, représenté par des cercles bleus. Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous avons fait le choix de considérer que la zone de communication et la portée de détection sont égales ($d = \pi_a$). Certains drones N_D sont déployés afin de fournir aux utilisateurs un réseau d'accès $N_D = 3$. Les UAVs sont ainsi supposés se rapprocher le plus possible d'un nombre maximal d'utilisateurs tout en

Paramètre	Notation
Utilisateur i	\mathcal{U}_i
Drone k	\mathcal{D}_k
Point d'intérêt j	\mathcal{P}_j
L'ensemble d'utilisateurs	\mathcal{U}
L'ensemble de drones	\mathcal{D}
L'ensemble de POIs	\mathcal{P}
$card(\mathcal{U})$	N_U
$card(\mathcal{D})$	N_D
$card(\mathcal{P})$	N_P
Probabilité d'attractivité	p
Zone de communication d'un drone	d
Portée de détection d'un drone	π_a

TABLEAU 3.1 Récapitulatif des paramètres de la modélisation.

préservant une distance minimale les uns par rapport aux autres, étant attirés par les utilisateurs se trouvant dans la zone de communication.

Nous présentons dans le tableau 3.1 un rappel des paramètres de modélisation.

3.3 Modélisation des conditions de communication

Quant à la modélisation du canal de communication utilisé, nous avons voulu proposer quelque chose d'aussi général que possible. Effectivement, en fonction de la technologie utilisée, différents paramètres du modèle de canal devront être pris en compte, mais l'impact sur le modèle d'interaction entre les utilisateurs et le drone doit être minimal.

La modélisation des conditions de communication est un élément important. Comme chaque composante de notre modèle, elle aura plusieurs fonctions. D'une part elle nous permet de mettre en œuvre une simulation capable d'évaluer les performances des moyens de communication offerts aux utilisateurs, d'autre part elle nous fournit un objectif dans le cadre d'une recherche de solution optimale par une approche analytique. De plus, elle peut être utilisée dans une implantation réelle afin de garder les mouvements des drones en recherche d'une position permettant de bonnes conditions de communication.

On peut imaginer par exemple que ce modèle soit utilisé pour décrire les

forces d'attraction et de répulsion entre les charges évoquées précédemment. Ainsi les mouvements qui en découleront seront plus intimement liés à leur objectif, d'améliorer les communications.

L'incidence du modèle de communication est ressentie sur le diamètre de la zone de communication. En effet, d est déterminé en fonction des caractéristiques du canal de communication. Nous avons imaginé trois types de modèle de communication qui seront présentés par la suite.

Il faut bien sûr prendre en compte que le drone \mathbb{D}_k se situe en altitude $h_{\mathbb{D}_k}$. L'altitude de l'UAV est un paramètre du modèle car la taille de la zone de communication d est calculée en fonction de celle-ci. Imaginons un PA omnidirectionnel ayant une portée a . Si l'utilisateur et le point d'accès se retrouvent à la même altitude, l'utilisateur doit se retrouver à une distance d'au plus a pour recevoir les ondes émises par le PA, donc la zone de communication sera égale à la portée du PA. En revanche, une fois placé en altitude, le diamètre de la zone de communication est égal à $d = \sqrt{a^2 - h^2}$, où a est la portée et h la différence d'altitude entre l'utilisateur et le drone. Comme déjà mentionné, la zone de communication est représentée par le diamètre d'un cercle ayant le drone au centre. Intuitivement, on voit que plus le drone se situe en altitude, plus la zone de communication rétrécit pour une portée constante, mais moins les UAVs seront gênés par des obstacles. Dans notre modèle, nous considérons que l'altitude de l'utilisateur h_{U_i} est égale à 0 m et qu'un drone se situe à $h_{\mathbb{D}_k} = 100$ m, $\forall k \in \mathcal{D}$. Nous avons choisi arbitrairement cette valeur pour offrir une zone de communication assez large tout en évitant la majorité des obstacles au sol.

Un modèle binaire

Un modèle classique, utile comme repère pour représenter les conditions de communication est une abstraction binaire de l'état de la communication, "associé/non associé", illustré dans la figure 3.7 par la courbe verte. Un utilisateur est considéré comme associé à un PA s'il remplit une certaine condition. Dans notre cas, nous considérons qu'un utilisateur est associé à un drone si la distance entre eux est inférieure à un seuil. Ce qui revient à dire que nous considérons un modèle de propagation simple, fondé uniquement sur la distance. Ce type d'abstraction a l'avantage d'être simple à implémenter, en revanche, il ne tient pas compte des



FIGURE 3.7 Représentation visuelle des trois modèles de couverture.

conditions réelles de communication, comme l'affaiblissement de propagation des ondes radio, ou des différentes techniques d'adaptation du débit.

Pour une antenne omnidirectionnelle qui a un gain de 2 dBi et une puissance d'émission de 15 dBm et en prenant en compte l'altitude du drone, $h_{\mathbb{D}} = 100$ m, le diamètre de la zone de communication sera égal à $d \approx 50$ m. Pour simplifier la modélisation, nous considérons que $d = 50$ m. Un tel modèle, du fait de sa grande simplicité, sera utile dans des phases préliminaires ou lourdes en calcul (telle que la recherche d'un optimal par des techniques analytiques).

Affaiblissement de propagation

Pour intégrer dans la modélisation les conditions du lien de communication, nous devons prendre en compte l'affaiblissement de propagation des ondes radio. Une deuxième abstraction effectuée revient à modéliser le canal à l'aide de l'équation des télécommunications, ou l'équation de Friis [99], qui permet d'obtenir un ordre de grandeur de la puissance en espace libre reçue par un récepteur situé à une certaine distance de l'émetteur, représenté dans la figure 3.7 par la courbe rouge. Elle est fondée sur la loi en carré inverse qui stipule que la puissance reçue décroît d'un facteur du carré de la distance entre le récepteur et l'émetteur.

$$P_r = G_t \times G_r \times P_t \times \left(\frac{\lambda}{4 \times \pi \times \mathcal{L}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}}} \right)^2 \quad (3.9)$$

L'équation (3.9) présente la méthode de calcul de la puissance reçue par un récepteur se situant à une certaine distance de l'émetteur. P_r dénote la puissance reçue en Watts (W), G_t et G_r les gains de l'antenne d'émission et respectivement de réception en dBi , décibel isotope, P_t la puissance du signal reçu en Watts. Le terme $\frac{\lambda}{4 \times \pi \times \mathcal{L}_D^U}$ dénote l'affaiblissement de propagation, où $\mathcal{L}_D^U = \sqrt{(x_U - x_D)^2 + (y_U - y_D)^2 + (h_U - h_D)^2}$ et λ représente la vitesse de la lumière.

Appliquée à notre modèle, l'équation des télécommunications va prendre en compte la distance entre le drone et l'utilisateur se trouvant au sol. De plus, nous considérons que le choix d'un seuil minimal acceptable pour la puissance reçue est important. Même si certaines technologies sans fil sont capables de fonctionner à des puissances reçues inférieures à -65 dBm, nous considérons que pour offrir des conditions acceptables de transfert d'information entre le drone et l'utilisateur, un seuil supérieur au seuil minimal devra être choisi pour considérer l'utilisateur associé au drone. Nous fixons donc ce seuil à -65 dBm, revenant à un diamètre de la zone de communication autour de ≈ 50 m, pour un drone situé à $h_D = 100$ m, pour une émission faite par un utilisateur ayant la $P_r = 16$ dBm, un gain de l'antenne de 1 dBi et pour un PA ayant un gain de 5.2 dBi, la fréquence utilisée étant de 5.1 GHz.

Ce deuxième modèle est plus précis et réaliste que le premier. Bien sûr, il ne tient pas compte de l'environnement, mais il reste pertinent dans un espace ouvert et sans obstacles.

Modèle en escalier

En prenant en compte l'atténuation du signal, un troisième modèle de canal peut être envisagé, celui-ci utilisant l'information sur l'atténuation pour déterminer le débit potentiellement atteignable par l'utilisateur. L'adaptation du schéma de modulation et de codage correcteur d'erreur, *Modulation and coding scheme* (MCS), en fonction de la qualité de la liaison radio se traduira en un niveau de débit maximum en fonction de la position de l'utilisateur, voir courbe bleue sur la figure 3.7.

Si l'atténuation du signal radio est faible, un schéma de modulation efficace et un code correcteur d'erreur faible seront utilisés. Cela donne un débit élevé sur le canal radio. Si les conditions du canal radio sont mauvaises, un schéma de

Schéma	Débit maximum théorique	Limite puissance signal
MCS6	65 Mbps (δ_6)	-53 dBm (th_6)
MCS5	58.5 Mbps (δ_5)	-55 dBm (th_5)
MCS4	39 Mbps (δ_4)	-57 dBm (th_4)
MCS3	19 Mbps (δ_3)	-60 dBm (th_3)
MCS2	13 Mbps (δ_2)	-63 dBm (th_2)
MCS1	6.5 Mbps (δ_1)	-65 dBm (th_1)

TABLEAU 3.2 Exemple de schéma de modulation et de codage.

modulation de bas niveau, plus robuste, est utilisé et un code correcteur d'erreur plus redondant sera utilisé. Le volume de données utiles chutera considérablement.

Prenons comme exemple le schéma de modulation et de codage décrit dans le tableau 3.2 fondé sur le standard *802.11n*. En utilisant la puissance reçue, décrite précédemment, nous obtenons un modèle de canal plus réaliste. En fonction de la puissance du signal, en plus de déterminer si un utilisateur est associé à un drone, ce modèle permet de déterminer le débit maximum qu'il peut atteindre en différenciant la qualité de service, décrite par la suite.

Simplement il peut être vu comme un modèle binaire appliqué à plusieurs seuils (th) déterminés en fonction de la distance extraite de la puissance reçue, donnée par le deuxième modèle. Ce troisième modèle est en effet une fusion des deux premiers en reprenant ainsi les principaux avantages.

3.4 Modélisation du trafic réseau et la QoS

Nous considérons diverses applications pouvant être embarquées par le réseau de drones : collecte des données issues des capteurs IoT, surveillance vidéo, communications vocales de type VoIP, etc. En fonction du scénario, de multiples applications de ce réseau peuvent être envisagées.

L'objectif de ces travaux n'est pas de proposer ou améliorer les algorithmes d'ordonnancement du trafic ou de mise en place de la QoS. Nous ne mettrons donc pas en place un modèle de trafic sophistiqué, nous supposons cependant que chaque utilisateur a des besoins en communication, avec des ressources limitées disponibles sur chaque drone. Pour des soucis de simplification, nous considérons que les besoins des utilisateurs sont identiques, une pondération pourrait être tout

à fait envisageable. Chaque \mathbb{D}_k aura donc une capacité limitée $\kappa_{\mathbb{D}_k}$, exprimée en nombre d'utilisateurs et fixée arbitrairement dans nos modélisations à 50. Dans ces conditions, il faut davantage de drones pour couvrir les utilisateurs concentrés dans la même région. Un exemple typique, lorsque la probabilité d'attractivité d'un POI p est élevée, les utilisateurs vont se regrouper étroitement dans une petite zone autour des points d'intérêt. Le trafic dans le réseau sera ainsi modélisé par une demande continue de la part des utilisateurs. Le drone divisera ainsi le débit disponible à chaque utilisateur en ne dépassant pas le débit maximum que celui-ci peut atteindre en fonction des conditions de réception.

La qualité de service pourra être exprimée dans nos modèles en pondérant les "charges" de chaque équipement. Comme présenté précédemment, chaque drone est attiré par une "charge" se situant au sol, dans la zone à couvrir. Pour mettre en place la QoS, chaque utilisateur possède une charge variable qui définit en quelque sorte l'intérêt que le drone doit lui porter. En variant cette valeur, un utilisateur sera couvert en priorité, ou choisi pour être couvert au détriment d'un autre moins prioritaire.

3.5 Simulateurs et simulation

Les expériences sur les réseaux de drones constituent l'un des environnements les plus difficiles pour effectuer des essais. Réaliser des expérimentations qui impliquent des drones est une opération coûteuse puisque chaque test en vol nécessite un nombre considérable d'équipements spécialisés, de drones, d'antennes, de personnel et d'infrastructures et à risque car en cas de défaillance matérielle ou de conception les équipements utilisés peuvent être détruits en cas d'accident. Cette complexité augmente considérablement lorsque ces expériences nécessitent la coopération de plusieurs UAVs. En outre, des règles de sécurité aérienne sont imposées pour les vols d'essai qui doivent être effectués dans des zones éloignées prédéfinies et des certifications doivent être obtenues pour opérer un tel type de test. Par conséquent, toute nouvelle proposition dans ce domaine doit être attentivement testée avant d'être mise en œuvre dans une application réelle. De plus, les conditions météo très variables (vent, pluie, etc.) nécessitent un grand nombre d'expériences, ce que la durée de vie des batteries ne rend pas facile. Par conséquent, la simulation est une alternative intéressante avant la mise en œuvre réelle.

Ns-2 [100] est l'outil de simulation le plus populaire. Il a débuté sous le nom de *ns* (*network simulator*) en 1989 dans le but de simuler le réseau en général. Ns-2 est un simulateur à événements discrets orienté objet, son approche modulaire le rendant extensible. Les modélisations sont basées sur un mélange de C++ et OTcl. La simulation s'exécute au niveau du paquet, permettant des résultats détaillés. En revanche, ns-2, ne peut pas modéliser les communications en trois dimensions [51], paramètre important dans les simulations des FANETs. Aero-Sim [101] est basé sur ns-2 permettant de prendre en charge la simulation des FANETs en proposant de nouvelles fonctionnalités. Ce simulateur prend en charge les environnements tridimensionnels et propose des attributs des nœuds aéronautiques. Dans Aero-Sim nous pouvons trouver trois types de nœuds aéronautiques : des avions, des aéroports et des satellites. Malheureusement, cette mise en œuvre permet d'effectuer des simulations sur des avions génériques, mais ne convient pas bien aux réseaux de drones car la personnalisation du code source pour introduire nos modèles est complexe et prend du temps.

Semblable à ns-2, ns-3 [102] est également un simulateur de réseau à événements discrets et open-source. Grâce à un large soutien de la communauté, ns-3 peut simuler de nombreuses technologies et incorporer une variété de modèles statistiques liés au canal, à la mobilité et à la génération de trafic, et fournit une modélisation détaillée des opérations de la couche physique. D'un autre côté, peu de modules de drones sont disponibles, ce qui nécessite un temps considérable pour les adapter et mettre en œuvre un modèle proposé. Une solution prometteuse appelée FlyNet-Sim [103] a été proposée en 2018 intégrant les relations entre la communication, l'environnement réseau et le contrôle des UAVs, tel que la navigation, et l'état des systèmes internes, tout en incluant plusieurs technologies de communication sans fil. Cependant, cette solution est venue trop tard pour être considérée candidate pour nos simulations.

Semblable à ns-2 et ns-3, OMNeT++ [104] est également un simulateur open-source fondé sur des modules, proposant une interaction via l'interface graphique. Son principal domaine d'application est les réseaux de communication. OMNeT++ possède une architecture générique et flexible qui le rend également performante dans d'autres domaines. UAVSim [105] est une extension de OMNeT++, proposant une modélisation des drones. Ce module est principalement développé pour l'analyse des cyber-attaques. Tous les modules proposant la simulation des drones que nous

avons pu trouver ne sont pas assez précis pour intégrer les spécificités de notre modèle de placement.

L'environnement logiciel OPNET [106] est spécialisé dans la recherche et le développement de réseaux. Il peut être utilisé avec souplesse pour étudier les réseaux de communication, les protocoles et les applications. En tant que fournisseur de logiciels commerciaux, OPNET offre une interface graphique relativement puissante aux utilisateurs. Cependant, il ne peut pas facilement modéliser les spécifications des systèmes UAVs. Bien que plusieurs travaux de recherche dans le domaine des FANETs aient été simulés sur OPNET, il n'existe pas de modèle d'UAV permettant de simuler facilement des FANETs.

Même si une gamme large de simulateurs existe déjà, ceux-ci fonctionnent à une granularité plus fine, au niveau paquet, que les besoins de cette thèse. En revanche, nous avons considéré que pour atteindre le niveau de détail nécessaire en terme de placement, nous devons implanter cette solution fondée sur la loi de Coulomb dans notre propre simulateur qui a été développé en Java pour profiter des avantages de la programmation orientée objet. La réalisation d'un nouveau simulateur présente plusieurs avantages car nous pouvons nous assurer que nos exigences sont satisfaites et nous permet de prendre des décisions de conception qui répondent à nos besoins. Notre approche nous permet également de faire évoluer la fidélité de notre modèle en intégrant ou en modifiant facilement l'implémentation.

3.6 Modèle analytique

Dans cette partie, une approche analytique du modèle de placement présenté précédemment sera proposée. Cette formulation analytique se trouvera à la base d'un problème d'optimisation utile pour déterminer une borne supérieure pour notre modèle de placement.

En plus des notations introduites précédemment, nous utiliserons les éléments suivants : soit $\rho_{\mathbb{D}} = (x_{\mathbb{D}_k}, y_{\mathbb{D}_k}, h_{\mathbb{D}_k})$ la position du drone \mathbb{D} dans un espace tridimensionnel. De plus, soit $\mathbb{A}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} \in [0, 1]$ un indicateur d'association entre un utilisateur et un drone, $\mathbb{A}_{\mathbb{D}_k}^{\mathbb{U}_i} = 1$ si \mathbb{U}_i est associé au drone \mathbb{D}_k . Soit $\mathcal{L}(\rho_{\mathbb{U}}, \rho_{\mathbb{D}})$ la distance entre l'utilisateur \mathbb{U} et le drone \mathbb{D} et $\mathcal{L}(\rho_{\mathbb{D}}, \rho_{\mathbb{D}'})$ la distance entre le drone \mathbb{D} et le drone \mathbb{D}' . Pour des soucis de concision, nous allons dénommer les deux distances $\mathcal{L}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}}$ et $\mathcal{L}_{\mathbb{D}'}^{\mathbb{D}}$. Respectivement, le problème d'optimisation que nous

cherchons à résoudre est alors le suivant :

$$\begin{aligned} \max \mathbb{F}(\rho_1 \dots \rho_{N_D}, \mathbb{A}) \\ \text{sous contraintes} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\sum_{\mathbb{D} \in \mathfrak{D}} A_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} \leq 1 \quad \forall \mathbb{U} \in \mathfrak{U} \quad (3.11)$$

$$\sum_{\mathbb{U} \in \mathfrak{U}} A_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} \leq \kappa \quad \forall \mathbb{D} \in \mathfrak{D} \quad (3.12)$$

$$\mathcal{L}_{\mathbb{D}'}^{\mathbb{D}} \geq d \quad \forall \mathbb{D}, \mathbb{D}' \in \mathfrak{D}; \mathbb{D} \neq \mathbb{D}' \quad (3.13)$$

Nous cherchons à obtenir la position des drones $\rho_{\mathbb{D}}$ ainsi que l'état d'association $A_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}}$ afin de maximiser la fonction objectif (3.10), qui reste à définir par la suite. La solution est soumise à plusieurs contraintes. Les contraintes (3.11), (3.12) garantissent qu'un utilisateur ne peut être associé qu'à un seul drone et qu'un UAV ne peut pas dépasser sa capacité de couverture, nommée κ . (3.13) assure que deux drones ne peuvent pas se retrouver à moins de d , imitant l'effet de répulsion entre les deux drones.

Nous avons souhaité obtenir un modèle analytique le plus général possible. En effet, la fonction objectif peut être déclinée pour s'adapter à plusieurs modèles, obtenant ainsi des bornes supérieures spécifiques sans beaucoup d'effort. Nous pouvons imaginer plusieurs formes de fonction objectif :

- la maximisation du nombre d'utilisateurs couverts ;
- la maximisation du débit offert aux utilisateurs ;
- la maximisation de la puissance reçue par chacun d'entre eux ;
- la minimisation de l'énergie consommée par chaque drone.

Notre premier objectif est de proposer un mécanisme de placement des drones offrant une couverture la plus complète possible des utilisateurs en terme de communication. Nous allons donc définir la fonction objectif en ce sens. Pour cela, nous nous fondons sur les trois modèles proposés précédemment pour les communications.

Le modèle binaire

Naturellement, les déclinaisons du modèle analytique correspondent aux propositions faites dans la section 3.3. Le modèle binaire d'association nous donne une première estimation grossière de la borne supérieure en terme de nombre d'utilisateurs couverts, (3.14). Pour adapter le modèle analytique, nous introduisons $\mathcal{X}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} \in \{0, 1\}$ une variable binaire indiquant si l'utilisateur \mathbb{U} se trouve sous la couverture du drone \mathbb{D} (c'est-à-dire si la distance entre ces deux est inférieure au diamètre de la zone de communication d), (3.15), ainsi qu'une contrainte supplémentaire (3.16) pouvant imposer à un utilisateur de ne pas s'associer à un drone même s'il se trouve à sa portée (par exemple, quand la capacité du drone est atteinte).

Le problème qui en résulte est alors le suivant :

$$\mathbb{F}(\rho_1 \dots \rho_{N_D}, \mathbb{A}) = \sum_{\mathbb{U} \in \mathcal{U}} \sum_{\mathbb{D} \in \mathcal{D}} \mathbb{A}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} \quad (3.14)$$

$$\mathcal{X}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} = \begin{cases} 1, & \mathcal{L}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} \leq d, \quad \forall \mathbb{U} \in \mathcal{U} \quad \forall \mathbb{D} \in \mathcal{D} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\mathcal{X}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} = 0 \implies \mathbb{A}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} = 0 \quad (3.16)$$

Ce modèle, simple, nous permet de déterminer une borne supérieure en terme de nombre d'utilisateurs couverts. En revanche, il ne prend pas en compte la qualité du service assurée par le drone les couvrant.

Modèle fondé sur la qualité de service

Pour intégrer la QoS dans notre recherche de limite supérieure, nous devons inclure le modèle en escalier présenté précédemment. En effet, cela nous permettra de maximiser non pas le nombre d'utilisateurs, mais la qualité proposée, dans notre cas le débit de chaque utilisateur en rapport avec le drone qui le couvre. Pour ce faire, nous devons introduire une nouvelle variable, la puissance reçue. L'équation de télécommunications de Friis présentée à la section 3.3 est un modèle possible qui nous permet de calculer cette puissance, $\psi_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}}$. De plus, en se rapportant au tableau

3.2 la variable $\mathcal{X}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}}$ sera définie comme dans l'expression (3.17), où th_i représente le seuil minimum en terme de puissance du signal comme définit dans le tableau 3.2. Par rapport au modèle antérieur, $\mathbb{A}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} \in \{0, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6\}$ et des contraintes supplémentaires se rajoutent au modèle initial qui assurent que le débit que nous essayons de maximiser, exprimé par \mathbb{A} et défini par (3.18), ne puisse pas dépasser la limite supérieure du MCS, sans imposer la valeur du palier.

Au problème (3.14) nous rajoutons les définitions suivantes :

$$\mathcal{X}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} = \begin{cases} \delta_6, th_6 \leq \psi_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}}, \forall \mathbb{U} \in \mathcal{U} \quad \forall \mathbb{D} \in \mathcal{D} \\ \delta_i, th_i \leq \psi_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} < th_{i+1}, \forall \mathbb{U} \in \mathcal{U} \quad \forall \mathbb{D} \in \mathcal{D}, \forall i \in 1...5 \\ 0, \psi_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} < th_1, \forall \mathbb{U} \in \mathcal{U} \quad \forall \mathbb{D} \in \mathcal{D} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} = \delta_i &\implies \mathbb{A}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} \leq \delta_i, \forall i \in 1...6 \\ \mathcal{X}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} = 0 &\implies \mathbb{A}_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}} = 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Le problème exprimé sous cette forme nous permet de rechercher une solution optimale en terme de somme des débits offerts aux utilisateurs. Il n'intègre aucune forme d'équité, si bien que nous devons nous attendre au biais classique dans ce genre de situation : les solutions calculées risquent de favoriser un faible nombre d'utilisateurs, bien desservis, au détriment des utilisateurs auxquels seul un faible débit peut être offert et qui risquent donc de se voir "sacrifier".

Maximisation de la puissance reçue

Une autre approche possible d'un placement optimal est de maximiser la puissance reçue par les utilisateurs. Le seuil de puissance reçue th_1 désigne la puissance la plus basse en dessous de laquelle un terminal utilisateur n'est pas considéré comme associé au drone. En prenant le modèle générique présenté précédemment, la fonction objectif, (3.19) doit prendre en compte la puissance du signal reçue par l'utilisateur \mathbb{U} . De plus, \mathbb{A} , la variable définissant l'association entre un UAV et un utilisateur se voit attribuer une nouvelle contrainte (3.20), assurant qu'un utilisateur n'est pas associé à un drone si la qualité du lien ne le permet pas, tout en laissant le choix d'être associé si la puissance reçue est supérieure au seuil.

Le problème d'optimisation initial se voit modifié comme suit :

$$\mathbb{F}(\rho_1 \dots \rho_{N_D}, \mathbb{A}) = \max \sum_{U \in \mathcal{U}} \sum_{D \in \mathcal{D}} \psi_D^U \quad (3.19)$$

$$\psi_D^U > th_1 \implies \mathbb{A}_D^U = 0 \quad (3.20)$$

Ce problème va nous permettre de rapprocher le modèle mathématique de la réalité, un UAV devrait choisir de couvrir un utilisateur si la puissance du signal est suffisante pour offrir des communications fiables, c'est-à-dire, en essayant de placer le drone au plus près des utilisateurs.

3.6.1 Équité

Le choix du modèle mathématique, et intrinsèquement de la fonction objectif, n'est pas trivial. Un modèle "binaire", de type *couvert/pas couvert* implique la couverture d'un nombre maximal d'utilisateurs, sans tenir compte d'une quelconque qualité de réception des utilisateurs, observable dans la figure 3.8a qui montre un placement valable fourni par le modèle mathématique, mais qui ne propose pas de bonnes conditions de réception. En revanche, un modèle "en escalier" permettra une certaine prise en charge de la qualité du lien, le drone sera placé de manière à offrir le meilleur débit maximal possible, en fonction du scénario.

Comme évoqué précédemment, l'équité n'est pas un paramètre intégré dans les modèles décrits. Il est donc important de s'interroger sur les résultats fournis. Pour mieux observer le comportement, dans la figure 3.8b, nous présentons deux placements, chacun obtenu par la résolution d'un des deux modèles mathématiques. Nous remarquerons que le choix fait par le modèle "en escalier" (figure 3.8b bas) est de couvrir un seul utilisateur car le débit qu'il pourra lui fournir en étant juste au dessus est plus important que la somme des débits offerts aux deux utilisateurs en plaçant le drone au milieu des deux (figure 3.8b haut). Le choix de l'objectif de couverture n'est pas trivial, il revient à l'opérateur du réseau de choisir le modèle le mieux adapté au scénario précis dans lequel celui-ci se trouve. Il devra notamment répondre aux questions *Souhaite-t-on couvrir un maximum d'utilisateurs en leur offrant un débit minimal ?*, *Souhaite-t-on ignorer une partie d'utilisateurs, mais*

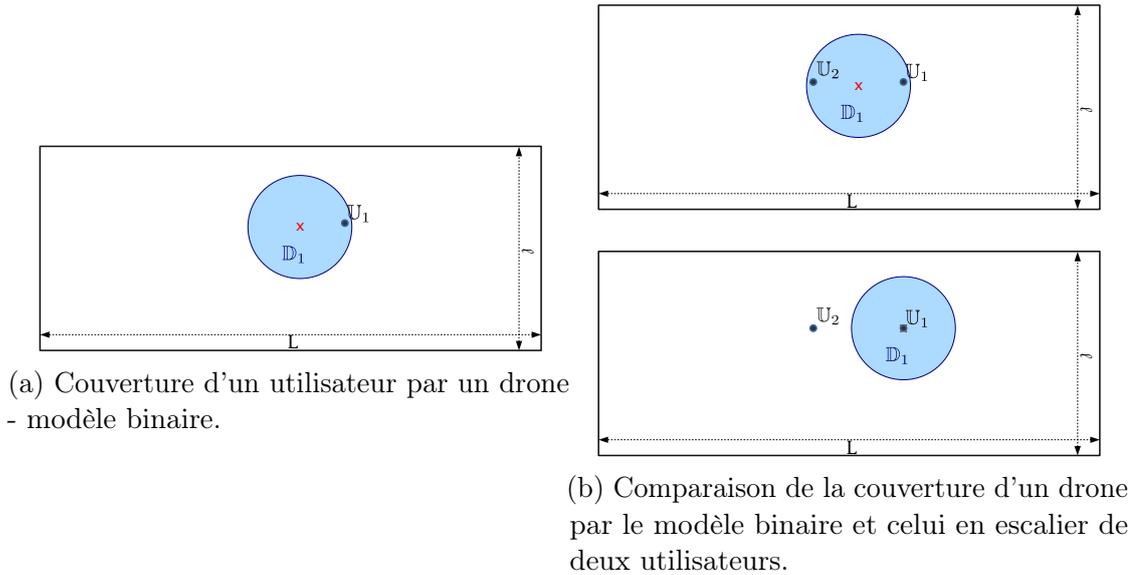


FIGURE 3.8 Comparaison de la couverture des modèles de placement.

offrir une meilleure couverture à ceux situés dans des positions favorables ? ou Souhaite-t-on "spécialiser" les drones en faisant cohabiter les deux mécanismes ?

Pour un scénario de type catastrophe naturelle, nous pourrions imaginer un mélange de deux modèles, offrant une meilleure couverture aux intervenants de la sécurité civile tout en couvrant un nombre maximum de public, mais dans de moins bonnes conditions.

Une piste possible pour surmonter cette imperfection pourra être d'adoucir le comportement du modèle en escalier en ajoutant un algorithme d'ordonnancement de type *Proportional Fairness* (PF)¹. Le but pourra être d'allouer des ressources de manière proportionnelle en fonction d'une caractéristique du réseau comme le débit, la distance, le rapport signal sur bruit, le taux d'erreur binaire, etc. L'algorithme d'équité proportionnelle proposé dans [107] réalise le partage des ressources en comparant le débit disponible à chaque utilisateur avec son débit moyen sur la durée de la connexion et en sélectionnant, à un instant donné de temps, celui présentant le rapport maximal. [108–110] sont d'autres travaux notables proposant des solutions au problème d'équité.

1. Équité Proportionnelle

3.6.2 Présentation du solveur

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé le solveur `CP Optimizer` [111] fourni par `CPLEX` [112]. Les trois modèles décrits seront implantés sous `CPLEX` sous forme de programmation par contrainte en nombre entiers quadratiques. Même si le premier modèle peut être résolu dans un temps raisonnable, les deux derniers, à cause du fait que, dans le premier cas les paliers introduisent un grand nombre de contraintes à tester et dans deuxième cas, la variable $\psi_{\mathbb{D}}^{\mathbb{U}}$ est définie sur le domaine réel et donc continue, les temps de résolution augmentent, ne permettant de fournir des optimums que pour un nombre réduit d'utilisateurs et drones.

Pour limiter le temps de résolution des problèmes par le solveur, nous avons choisi de représenter la zone géographique à couvrir par un maillage carré. Ainsi, les positions des utilisateurs sont exprimées de manière discrète sur une grille de taille $L \times \ell$ identique que celle présentée précédemment (1000×1000).

À noter que la contrainte (3.11) peut être relâchée car le fait d'imposer une distance minimale entre deux drones (3.13) et une distance minimale pour qu'un utilisateur soit associé à un drone garantit le fait qu'un utilisateur ne peut pas être associé à deux drones simultanément.

Il convient de présenter brièvement le fonctionnement de `CP Optimizer` pour une meilleure compréhension de la méthode utilisée dans la résolution du problème. Ce solveur a été introduit en 2007 et, par rapport à un solveur mathématique, un modèle de programmation par contraintes prend en charge les contraintes logiques ainsi qu'une gamme complète d'expressions arithmétiques. De plus, un modèle de programmation par contraintes ne limite pas les contraintes arithmétiques pouvant être définies sur les variables de décision, alors qu'un modèle mathématique est spécifique à une classe de problèmes dont la formulation satisfait certaines propriétés mathématiques (par exemple : quadratique, MIQCP et convexe ou non-convexe). Un moteur de programmation par contraintes prend des décisions sur les variables et les valeurs et, après chaque décision, effectue un ensemble d'inférences logiques afin de réduire les options disponibles pour les domaines des variables restantes. Il est ainsi capable de trouver la valeur optimale de la fonction objectif en parcourant de manière exhaustive toutes les solutions possibles. En revanche, un moteur de programmation mathématique, dans le contexte de l'optimisation discrète, utilise une combinaison de relaxations (renforcées par des plans sécants) et de "séparation

et évaluation".

CP Optimizer utilise uniquement des variables discrètes pour lesquelles un domaine doit être défini. Le produit de toutes les tailles des domaines constitue l'espace de recherche. L'espace de recherche regroupe toutes les combinaisons de valeurs dans les domaines des variables de décision. Ainsi, il explorera l'espace de recherche pour trouver une solution en appliquant 2 techniques principales : la recherche constructive et la propagation de contraintes.

Pour mieux comprendre les mécanismes utilisés dans la recherche de la solution optimale, prenons comme exemple 2 domaines des variables a et b . Ainsi, $D(a) = 5, 8, 9, 10, 11, 12$ et $D(b) = 4, 5, 6, 7, 8, 9, 15, 16, 17$. Initialement, le solveur appliquera la propagation initiale des contraintes qui supprime les valeurs des domaines qui ne feront partie d'aucune solution. Considérons $a + b = 17$, si nous prenons le plus petit nombre dans le domaine de a , qui est 5, et nous l'ajoutons au plus grand nombre dans le domaine de b , qui est 17, la réponse est 22. Cette combinaison de valeurs contredit alors la contrainte. La seule valeur de a qui fonctionnerait avec $b = 17$ est $a = 0$. Cependant, il n'y a pas de valeur 0 dans le domaine de a , donc b ne peut pas être égal à 17. L'algorithme de réduction de domaine utilisé par le moteur de propagation de contraintes supprime la valeur $b = 17$ du domaine de b . De même pour une contrainte $a - b = 5$, réduisant ainsi l'espace de recherche, obtenant à la fin $D(a) = 10, 11, 12$ et $D(b) = 5, 6, 7$.

Durant l'optimisation, la recherche constructive est utilisée en parallèle avec la propagation des contraintes. La recherche constructive guide la recherche de la solution dans l'espace de solution restant. Un arbre de solutions est construit, chaque branche représentant une décision dans la recherche et chaque feuille représente une combinaison de valeurs dans l'espace de recherche. Le solveur "tente" de définir une valeur pour une variable afin de déterminer si cela mènera à une solution.

En parallèle de la recherche constructive, une propagation continue des contraintes pendant la recherche est effectuée. La propagation des contraintes lors de la recherche supprime toutes les valeurs des domaines actuels qui ne respectent pas les contraintes. Pour essayer une valeur pour une variable, le solveur crée des domaines "test" et fixe la valeur d'une variable. Lorsque la propagation de contraintes supprime les valeurs des domaines lors de la recherche, les valeurs sont uniquement supprimées de ces domaines "test". Si aucune solution n'est trouvée avec la variable fixée, celle-ci sera supprimée définitivement de son domaine et le processus repren-

$L_{\mathbb{D}} \times \ell_{\mathbb{D}}$ grille des drones	Facteur	\mathbb{N}_D	\mathbb{N}_U	Temps de résolution
10 × 10	100	3	10	≈ 5 secondes
100 × 100	10	3	10	≈ 7 heures
1000 × 1000	1	3	10	≈ 18 jours

TABLEAU 3.3 Temps de résolution du modèle "en escalier" en fonction de la taille de la grille de recherche.

dra, en fixant une autre valeur à une variable et en remettant à zero les domaines "test". En reprenant l'exemple, le solveur a attribué la valeur 10 à la variable de décision a . En travaillant avec la contrainte $a + b = 17$, la propagation de la contrainte réduit le domaine de b à 7. Cependant, cette combinaison de valeurs $a = 10, b = 7$ ne respecte pas la contrainte $a - b = 5$. Ainsi, le solveur supprime la valeur $b = 7$ du domaine "test" de b . À ce stade, le domaine de b est vide et le solveur rencontre un échec. Il peut alors conclure qu'il n'y a pas de solution possible avec la valeur $a = 10$, supprimant ainsi 10 du domaine de a .

Une solution est un ensemble d'attributions de valeurs aux variables de décision, de sorte que chaque variable se voit attribuer exactement une valeur de son domaine et que, ensemble, ces valeurs satisfassent les contraintes. Une solution optimale est alors une solution qui optimise la fonction objectif. Le solveur calcule un objectif à atteindre, en fonction des valeurs restantes dans le domaine des variables. La solution optimale est trouvée quand la solution intermédiaire trouvée atteint l'objectif fixé. Cela peut se produire soit suite à un parcours exhaustif de l'arbre, soit grâce à la baisse de l'objectif engendré par l'élagage des valeurs du domaine, provoquant une révision de l'objectif fixé.

Les résultats fournis par le modèle mathématique serviront ainsi d'optimum pour les scénarios sur lesquels nous allons tester notre modèle de placement. En ce qui concerne la comparaison avec la valeur optimale, celle-ci sera faite sur un scénario réduit en nombre de drones et utilisateurs et en appliquant le modèle binaire, dû au temps que le solveur met pour atteindre l'objectif au vu de l'espace de recherche conséquent lorsque le nombre de drones augmente.

Pour montrer l'impact de la taille de la zone de recherche sur le solveur, nous présentons dans le tableau 3.3 le temps de résolution d'un problème d'optimisation en utilisant le modèle "en escalier". Nous avons fait varier l'ordre de grandeur, que nous allons appeler *facteur*, entre la grille sur laquelle les utilisateurs sont

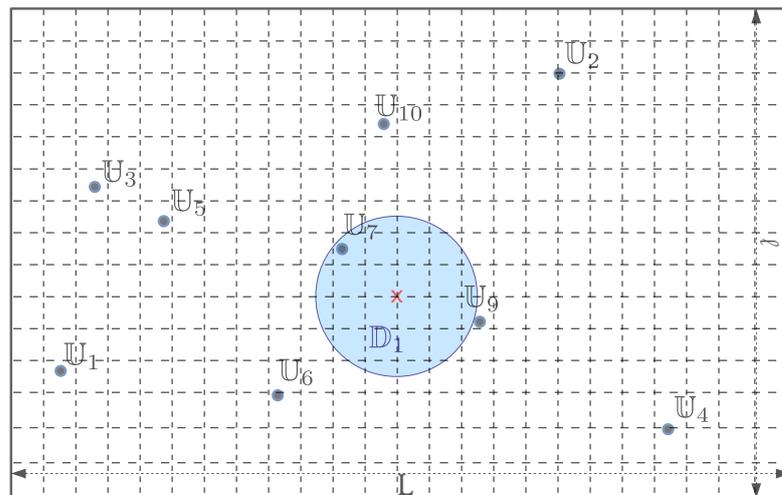


FIGURE 3.9 Un modèle de grille de recherche appliqué à un exemple de placement.

placés (toujours constante, 1000×1000) et la grille des positions possibles de drones lors de la résolution du problème, illustré dans la figure 3.9. Même si ce type d'approche analytique nous fournit des propositions de placement dans un temps acceptable, celles-ci restent bien évidemment sous-optimales car le drone sera placé de manière approximative pour couvrir les utilisateurs. Dans l'exemple donné, ce type de placement considérera l'utilisateur U_9 comme n'étant pas couvert, même si sur une grille avec un facteur = 1 celle-ci pourra être le cas.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter et analyser le fonctionnement de notre proposition à travers de nombreuses simulations effectuées à l'aide de l'implémentation que nous avons effectuée en Java. Nous utilisons les résultats fournis par ce modèle mathématique pour analyser la performance de notre proposition lorsque cela sera possible.

PLACEMENT DU RÉSEAU DE DRONES - CONTRIBUTIONS ET RÉSULTATS

4.1 Introduction

Nous considérons le scénario décrit dans le chapitre 1, et nous nous intéressons donc au placement initial des drones qui se fera en accord avec le modèle introduit dans le chapitre 3. Nous allons regarder d'un œil critique les performances de ce placement en évaluant son comportement dans différents cas de figure. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser d'abord à l'obtention de bornes supérieures en analysant les résultats du modèle mathématique décrit précédemment dans la section 3.6. Par la suite, les résultats numériques du modèle de placement fondé sur les forces d'attraction et de répulsion, obtenus via le simulateur que nous avons implanté, seront analysés, suivis d'une discussion sur la sensibilité de ce modèle à ses paramètres d'entrée et aux scénarios. Une contribution importante sur ce modèle est sa flexibilité car il est capable de se plier facilement aux contraintes imposées par tous les cas de figure dans lequel nous souhaitons déployer le réseau de drones.

De plus, nous allons prendre en considération les potentielles interférences que des UAVs à proximité peuvent induire, ainsi, une amélioration du modèle initial sera proposée, facilitant la gestion des canaux de communication. Un autre point que nous allons mettre à l'épreuve est la capacité du modèle de s'adapter aux

utilisateurs mobiles.

4.2 Placement initial

Nous devons commencer par analyser d'où les drones devront être déployés, une solution facile sera de les faire partir du même point, le centre de contrôle. Nous allons analyser ainsi le comportement de notre modèle de placement en s'intéressant premièrement à la couverture qu'il peut assurer. Pour ce faire, nous allons calculer le rapport entre le nombre total d'utilisateurs à couvrir et les utilisateurs concrètement couverts par un drone, que nous allons dénommer *utilisateurs associés*.

Remarque : Comme présenté dans le chapitre introductif, nous dénommons notre modèle de placement *Placement Initial des Drones* et nous allons utiliser une notation similaire à **PID-(0,0)-BINAIRE**. Le terme $(0,0)$ indique la position de départ des drones, dans ce cas, du point $(0,0)$. Les UAVs pourront partir du point $(0,0)$, d'un point aléatoire (**RANDOM**), uniformément choisi, ou des points d'intérêt (**POI**). À noter que le point de départ physique peut être différent. En effet, il s'agit de la position où les drones activeront le mécanisme de placement. Le deuxième terme, *binnaire* décrit ici le modèle de couverture des utilisateurs, en rapport avec le type de canal qui sera utilisé, conformément au chapitre 3.3. Quant aux modèles analytiques, nous allons les appeler **OPTI-BINAIRE** et **OPTI-DÉBIT**, *binnaire* ayant la même signification que ci-dessus et *débit* faisant référence au modèle en escalier.

Comme évoqué dans le chapitre 1, nous supposons que l'opérateur du réseau a un point de présence à proximité de la zone nécessitant une couverture via le réseau de drones. Pour des soucis de simplification, nous considérons dans nos simulations que ce centre se trouve à la position $(0,0)$.

Pour effectuer les simulations du mécanisme de placement nous avons considéré un scénario réalisable, une manifestation sportive accueillant $N_U = 500$ personnes. Pour ce type de rassemblement, l'opérateur du réseau pourra assez facilement identifier les points d'intérêt autour desquels les participants pourront se retrouver. Un exemple simple pour ce type de spectacle sportif, les POIs peuvent être les gradins, les buvettes, les stands, etc. Pour les tests effectués nous avons considéré $N_P = 5$. En ce qui concerne le nombre de UAVs utilisés, rappelons que dans notre modèle, nous avons considéré qu'un drone est capable de couvrir en simultanément

$\kappa = 50$ utilisateurs, ainsi, nous avons décidé de déployer $\mathbb{N}_D = 10$ drones pour donner la chance au modèle de couvrir à 100 % les participants lorsque p est élevé. Les drones utiliseront le modèle binaire pour assurer la couverture des utilisateurs, pour rappel, un utilisateur est considéré comme couvert par un drone si celui-ci se trouve dans la zone de couverture du drone, donc à une distance inférieure ou égale à $d = 50$ m.

Pour analyser la couverture du réseau, nous avons fait varier la probabilité d'attractivité d'un point d'intérêt envers les utilisateurs, $p \in [0, 1]$, cela signifiant que pour une probabilité de $p = 0$ les utilisateurs sont répartis uniformément dans l'espace de recherche, $L = 1000 ; \ell = 1000$, et pour une probabilité $p = 1$ les utilisateurs sont regroupés autour des POIs. Nous avons effectué une série de 50 simulations pour chaque probabilité, pour chaque simulation les positions des utilisateurs et des points d'intérêt sont régénérées. Pour chacune des simulations, les drones ont comme point de départ le centre de contrôle situé à $(0, 0)$.

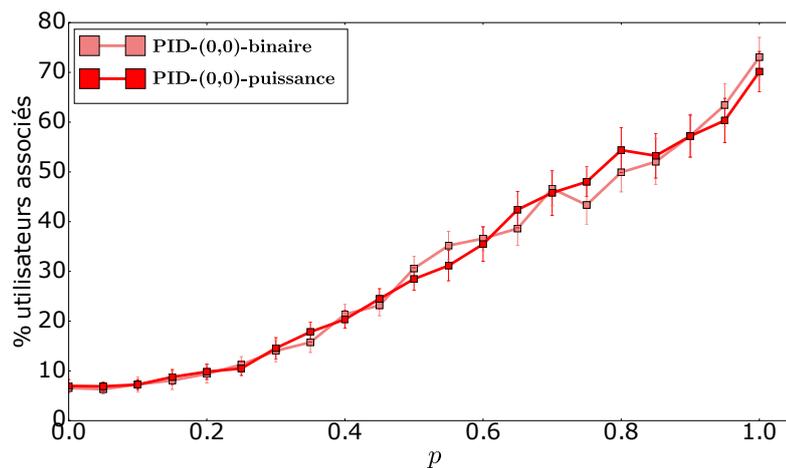
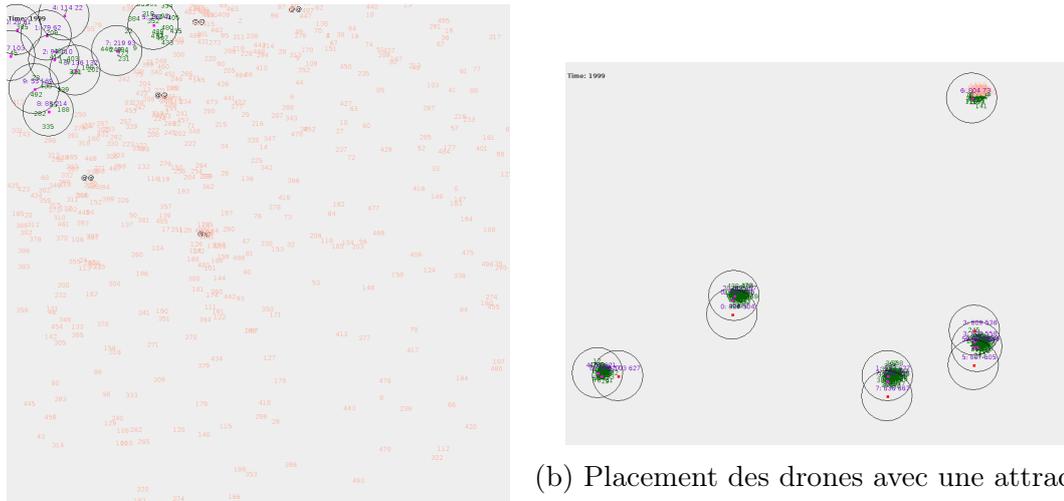


FIGURE 4.1 Pourcentage d'utilisateurs associés au réseau en départ du centre de contrôle.

4.2.1 Influence de p

Dans la figure 4.1 nous observons le pourcentage d'utilisateurs couverts en fonction de la probabilité d'attractivité atteinte par notre modèle de placement initial des drones, PID. Le résultat est marquant, contrairement aux attentes, dans le meilleur cas $p = 1$, les UAVs ne couvrent pas à 100% les utilisateurs. De plus,



(a) Placement des drones avec une attractivité $p = 0,05$

(b) Placement des drones avec une attractivité $p = 1,00$

FIGURE 4.2 Placement initial des drones au départ du centre de contrôle $((0,0))$.

pour des valeurs faibles d'attractivité, la couverture offerte par PID est inférieure à 10%.

Pour comprendre ces effets, il convient de regarder les positions exactes des drones à la suite du placement initial. En effet, en observant l'image 4.2a nous voyons que pour des faibles valeurs d'attractivité, les drones, partant du même point, le centre de contrôle, sont attirés par les premiers utilisateurs rencontrés, s'arrêtant donc d'avancer dans la zone à couvrir. En revanche, ce phénomène ne pourra pas se produire avec des valeurs d'attractivité qui tendent vers 1. Néanmoins, le pourcentage de couverture n'atteint pas la valeur maximale, un autre événement doit alors se produire.

Effectivement, l'image 4.2b est révélatrice de la cause de la non atteinte de la couverture maximale. Pour 500 utilisateurs et un nombre de 5 points d'intérêt, dans le scénario nous nous trouvons avec 100 utilisateurs par point d'intérêt. Un UAV possède une capacité de 50 utilisateurs, deux drones étant suffisants pour couvrir les 100 utilisateurs d'un point d'intérêt. Or, dans l'image nous observons un POI couvert par 3 drones, laissant donc certains utilisateurs non couverts. Ceci s'explique par le fait que dans la recherche des utilisateurs, plusieurs drones arrivent en même temps au dessus d'un POI, les utilisateurs choisissant un des points d'accès.

4.2.2 L'importance du point de départ

Ces résultats nous montrent clairement qu'une autre stratégie devra être choisie. Deux choix se dégagent en analysant les deux phénomènes qui se produisent quand les UAVs partent du centre de contrôle. Pour des faibles valeurs d'attractivité, un départ aléatoire des drones pourra suffire pour couvrir un nombre plus élevé des utilisateurs et quand $p \rightarrow 1$, il sera plus judicieux de faire partir les drones directement des points d'intérêt ; nous supposons, en effet, que leur position est connue.

Néanmoins, un problème potentiel peut être identifié, en fonction des scénarios de déploiement : l'accessibilité des chemins, pour ramener les drones à leur point de départ pourrait ne pas être assurée. Imaginons, dans le cas d'une catastrophe naturelle, les routes pourront être impraticables, empêchant ainsi l'opérateur du réseau à ramener les drones à leur point de départ respectif. Une solution de secours sera de toujours faire partir les UAVs du centre de contrôle, mais de ne commencer la recherche des utilisateurs qu'une fois qu'ils sont arrivés au point initial de recherche prédéterminé. Le revers de la médaille serait en revanche que l'opérateur sera obligé de payer ce déplacement en énergie consommée par les drones qui ne cherchent pas activement des utilisateurs.

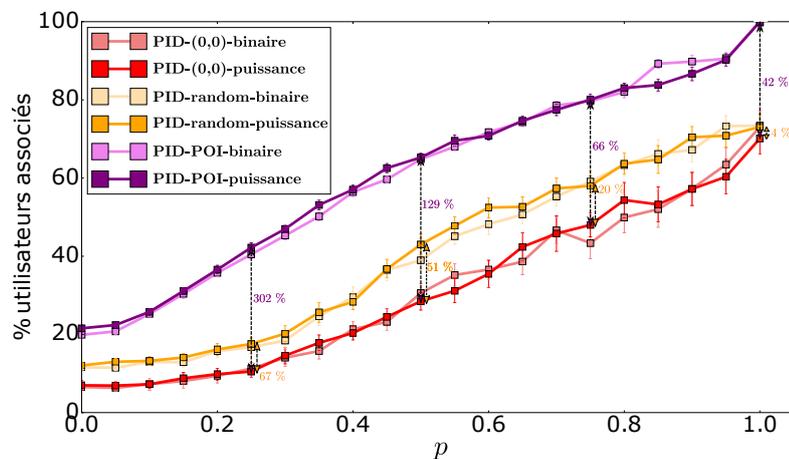


FIGURE 4.3 Pourcentage d'utilisateurs associés au réseau en variant le point de départ.

De ce fait, nous avons regardé si le changement du point de départ apporte une amélioration sur le pourcentage d'utilisateurs couverts, en fonction de p , la

probabilité d'attractivité des POIs. Dans la figure 4.3 nous avons comparé les trois points de départ des drones, comme introduits en début de chapitre. Nous avons comparé le pourcentage d'utilisateurs couverts en analysant uniquement le modèle de canal fondé sur la puissance, puisque la différence en terme de résultats entre les deux modèles est très faible. Un écart important entre le départ du centre de contrôle, **PID-(0,0)-PUISSANCE**, et départ des points d'intérêt, **PID-POI-PUISSANCE** peut être observé. Un autre phénomène intéressant peut être vu après une analyse plus fine des courbes. En effet, pour des faibles probabilités d'attractivité, l'écart relatif entre les deux points de départ est supérieur à 100 % (302 % pour $p = 0.25$ et 129 % pour $p = 0.5$). Ceci confirme que changer le point de départ des drones est une solution possible au problème d'attraction des utilisateurs par des utilisateurs isolés. Pourquoi cet écart important ? Réellement, les utilisateurs sont toujours placés en gardant les POIs comme centre et en suivant la probabilité d'attractivité du point d'intérêt. Naturellement, un nombre plus grand d'utilisateurs sera concentré autour des POIs favorisant une meilleure couverture de l'algorithme de placement. Ceci justifie aussi pourquoi en faisant partir les UAVs des positions aléatoires, **PID-RANDOM-PUISSANCE** dans la zone à couvrir augmente de quelques pourcents la couverture (67 % pour $p = 0.25$ et 4 % pour $p = 1$). En fonction de la position aléatoire, le placement initial des drones a des meilleures chances de démarrer dans des zones plus peuplées. Une autre remarque qui pourra être faite réside dans le pourcentage de couverture dans le cas où $p = 1$. Le seul moyen d'atteindre 100 % d'utilisateurs associés est de faire partir les drones des POIs. Le phénomène décrit précédemment, où nous rencontrerons un nombre plus grand d'UAVs que celui nécessaire pour couvrir les utilisateurs d'un point d'intérêt, se reproduit si les drones partent des points aléatoires, l'important étant d'espacer les drones, le plus possible, dans la zone de recherche.

4.2.3 Conclusion

En conclusion, nous avons constaté que l'algorithme de placement initial des drones arrive à accomplir sa tâche principale, c'est-à-dire trouver et couvrir les utilisateurs. Toutefois, une découverte associée a été faite, le choix de la position de départ des UAVs n'est pas anodin. Nous avons constaté qu'en fonction de la position des utilisateurs, les drones peuvent se trouver immobilisés par des utilisateurs

isolés, les empêchant ainsi d'atteindre une couverture élevée, comme c'est le cas du **PID-(0,0)-PUISSANCE**. Pour cela, nous nous sommes intéressés à différents points de départ et nous avons constaté qu'il est plus astucieux de faire partir les drones directement des points d'intérêt lorsque c'est possible, l'écart en terme d'utilisateurs associés au réseau étant considérable. Pour la suite de l'analyse des résultats de simulation, nous allons nous intéresser principalement à **PID-POI-PUISSANCE**, sauf indication contraire. Par la suite, nous allons analyser l'effet que la proximité immédiate entre plusieurs drones peut avoir sur les utilisateurs.

4.3 Prise en compte des interférences

Les drones sont équipés d'une antenne hertzienne, par exemple une antenne Wi-Fi, qui permet la connexion des utilisateurs au réseau fournissant ainsi les services proposés par l'opérateur du réseau. En général, deux antennes couvrant la même zone et utilisant la même fréquence vont provoquer des interférences pour les utilisateurs qu'elles couvrent. Ces interférences peuvent se traduire par une attente plus longue pour envoyer un message, même si l'antenne dont l'utilisateur dépend est disponible, l'antenne émettrice voisine va bloquer le canal de transmission.

Dans notre cas, nous avons déjà observé dans la figure 4.2b que les drones peuvent se trouver à proximité. Ce voisinage est notamment constaté dans le cas des valeurs de p élevées, mais également si plusieurs POIs sont à proximité. Dans les deux cas, plusieurs drones sont nécessaires pour couvrir la totalité des utilisateurs situés aux alentours du point d'intérêt provoquant ainsi des perturbations pour les utilisateurs qui se retrouvent sous la couverture de plusieurs UAVs. Ces interférences sont dues principalement au fait que les drones utilisent le même canal de communication.

4.3.1 L'impact des interférences

Nous nous sommes ainsi intéressés au nombre d'utilisateurs qui peuvent se retrouver dans de telles conditions de réception. Dans la figure 4.4 nous montrons le pourcentage d'utilisateurs se retrouvant sous la couverture de plusieurs UAVs, et donc en condition d'interférences. Nous remarquons que nos hypothèses étaient fondées. Bien entendu, l'utilisation de la même fréquence sur chaque drone crée

des interférences massives avec plus de 50 % des utilisateurs interférés lorsque p est élevé, car les UAVs tentent de couvrir autant d'utilisateurs que possible.

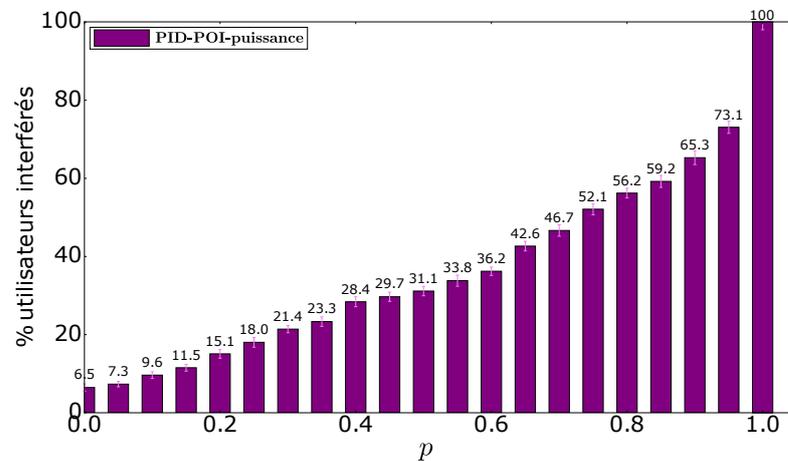


FIGURE 4.4 Pourcentage d'utilisateurs se situant sous la couverture de deux drones - conditions d'interférences.

Il va de soi que nous devons proposer une amélioration de notre algorithme de placement initial pour pallier ce phénomène. L'amélioration que nous devons apporter doit avoir comme but d'éliminer la couverture multiple des utilisateurs faite par des drones utilisant le même canal de communication. Comme nous l'avons déjà mentionné dans la description du modèle, le réseau de drones que nous proposons a la capacité de se placer sans connaître la position exacte des utilisateurs grâce à une analogie avec les forces d'attraction et répulsion entre des charges électriques.

Alors, le chevauchement entre les drones peut être géré en modifiant le rapport entre les charges virtuelles que nous attribuons aux UAVs et aux utilisateurs, jouant ainsi sur le rapport entre les forces répulsives et d'attraction. En revanche, cela forcera l'opérateur du réseau à faire un compromis entre la couverture des utilisateurs et la réduction des interférences. Si tel est le cas, la charge d'un UAV devient plus grande que la somme des charges du nombre maximal qu'un drone peut couvrir, les forces de répulsion vont forcer les deux drones à se déplacer pour éviter la superposition des deux drones, baissant ainsi le pourcentage d'utilisateurs associés.

4.3.2 Le multi-canal

Une deuxième technique, aussi générale que la première, peut également être envisagée. De nos jours, les progrès dans le domaine des télécommunications faits sur la couche physique nous permettent l'utilisation des techniques par lesquelles la largeur de bande totale disponible dans un support de communication est divisée en une série de bandes de fréquences, chacune d'entre elles étant utilisée pour acheminer des messages des utilisateurs.

Dans le cas des réseaux de téléphonie mobile, on parle de cellules, représentant la zone de couverture de chaque antenne. En général, chaque cellule utilise une bande fréquentielle différente sur des cellules voisines. L'intérêt est de limiter autant que possible l'effet des interférences provoquées au sein de la même cellule par les utilisateurs ainsi que les interférences inter-cellules. Différentes techniques d'accès multiple en fréquence sont utilisées dans lesquelles plusieurs émetteurs peuvent envoyer des informations simultanément sur un même canal de communication comme *Code-division multiple access (CDMA)* [113] ou *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)* [114] permettant ainsi grâce au progrès d'obtenir un taux de réutilisation des fréquences égal à 1.

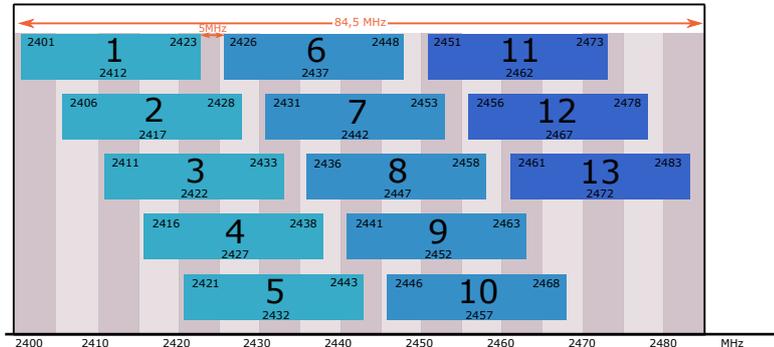


FIGURE 4.5 Canaux Wi-Fi disponibles dans la bande fréquentielle 2,4 GHz.

En ce qui concerne les réseaux Wi-Fi, chaque PA définit une zone de couverture, équivalente aux cellules dans les réseaux mobiles. De plus, les bandes fréquentielles destinées au Wi-Fi sont divisées en sous-bandes appelées canaux. En fonction de la fréquence utilisée et de la norme Wi-Fi déployée, un nombre différent de canaux est disponible. Commençons par regarder comment le spectre fréquentiel est divisé dans les réseaux Wi-Fi. La figure 4.5 nous montre les canaux disponibles dans la

bande *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) 2,4 GHz. Cette bande est divisée en 13 canaux de 20 – 22 MHz chacun, qui se recouvrent, de par la faible largeur de la bande 2,4 GHz, la transmission ne se faisant que sur un canal donné. Puisque les canaux sont superposés, pour limiter les interférences, il faut judicieusement choisir les canaux utilisés par des PAs voisins. Ainsi, en même temps, seulement trois canaux au maximum peuvent être utilisés sans provoquer des interférences sur les PAs voisins.

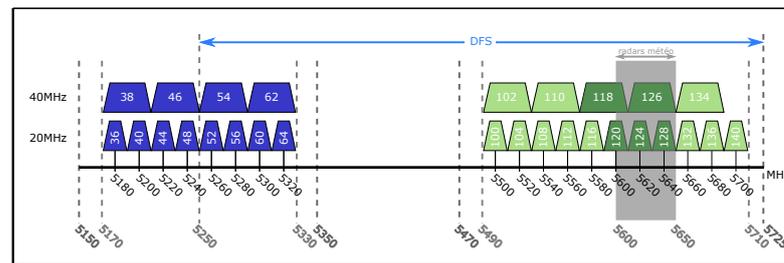


FIGURE 4.6 Canaux Wi-Fi disponibles dans la bande fréquentielle 5 GHz.

Le nombre de canaux disponibles dans la bande *Unlicensed-National Information Infrastructure* (U-NII) en 5 GHz est plus grand, conformément à la figure 4.6. Grâce à une bande fréquentielle plus large, le nombre de canaux utilisables dans la bande U-NII s'élève à 19 canaux de 20 MHz non superposés. De plus, les normes Wi-Fi plus récentes prévoient l'utilisation des canaux plus larges, 40, 80 ou 160 MHz, en plus de ceux à 20 MHz, offrant ainsi un débit plus élevé.

En revanche, l'utilisation de la bande 5 GHz vient avec un inconvénient. En effet, les fréquences 5250 – 5350 MHz et 5470 – 5725 MHz sont également utilisées par d'autres types d'applications comme la radiolocalisation, ou les radars météorologiques sur la bande 5600 – 5650 MHz. Les PAs utilisant des canaux dans ces fréquences doivent utiliser un mécanisme de sélection dynamique de fréquences *Dynamic Frequency Selection* (DFS) permettant au point d'accès de changer de canal automatiquement s'il détecte qu'une autre application l'utilise. De plus, certains canaux, en bleu sur notre figure, ne peuvent pas être utilisés à l'extérieur pour ne pas interférer avec les autres applications qui utilisent la bande U-NII.

4.3.3 Le multi-canal dans PID

Nous observons que le standard Wi-Fi permet une utilisation en parallèle de plusieurs canaux, facilitant ainsi la gestion des interférences dans notre réseau. Ainsi, pour limiter les perturbations entre des drones voisins nous choisissons d'étendre PID en rajoutant un mécanisme permettant à chaque drone de changer automatiquement de canal si celui-ci détecte que les mêmes fréquences sont utilisées par un de ses voisins.

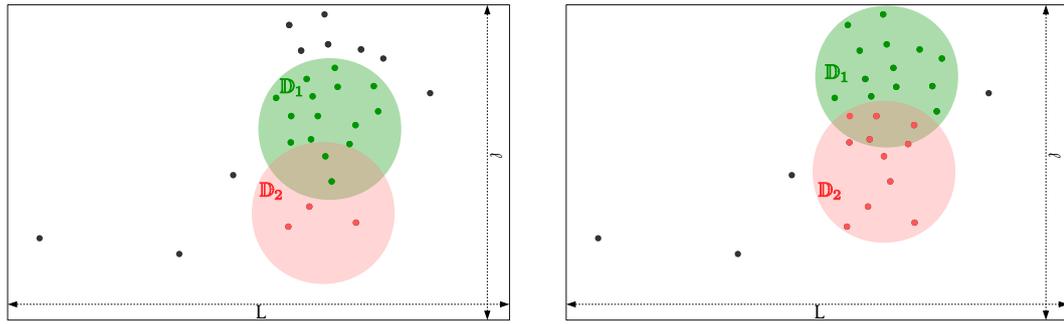
En conséquence, les drones avoisinants collaborent pour éviter d'utiliser le même canal, chacun échangeant avec ses voisins des informations sur les canaux utilisés. En fonction des informations reçues, ils changent leur canal pour éliminer les interférences locales.

Au début, chaque drone choisit arbitrairement un canal Wi-Fi. L'UAV qui découvre le premier, par le biais des messages échangés entre drones, qu'un voisin utilise le même canal que lui, va choisir aléatoirement un canal qui n'est pas déjà utilisé par ses voisins et notifie le voisinage de ce changement pour éviter que les UAVs voisins prennent la même décision. Puisque les communications Wi-Fi se font sur des canaux à contention, un seul drone pouvant envoyer des messages simultanément, il ne peut y avoir qu'un seul UAV qui change de canal à un instant donné, car ils doivent en informer les voisins avant de procéder au changement.

Ainsi, en introduisant ce mécanisme dans PID, nous avons aussi adapté l'étendue des forces de répulsion. Pour mieux comprendre, on peut voir chaque canal comme une couleur. De cette manière, les charges des drones deviennent colorées et agissent dorénavant qu'avec d'autres charges de même couleur, donc les UAVs qui utilisent le même canal vont interagir.

Nous souhaitons que ce changement de canal se fasse de manière transparente pour les utilisateurs de sorte à éviter les coupures de service que le réseau fournit. Un changement de canal au niveau du point d'accès se traduira par une notification *Channel Switch Announcement (CSA)* de la part du PA permettant d'annoncer qu'il passe sur un nouveau canal avant de commencer à émettre sur ce canal en envoyant un certain nombre de balises contenant l'annonce de la CSA avant de basculer sur le nouveau canal. Cela permet aux clients de passer sur le nouveau canal avec une coupure de service minimale.

Puisque les drones n'interagissent plus quand ils utilisent des canaux différents,



(a) Représentation du multi-canal sans partage de charge. (b) Représentation du multi-canal avec partage de charge.

FIGURE 4.7 Le partage de charge avec l'utilisation du multi-canal.

des situations où le chevauchement entre les UAVs est conséquent, peuvent apparaître. Dans la figure 4.7a le drone \mathbb{D}_2 vient de découvrir des utilisateurs non couverts et, pour les couvrir, adapte son canal, ici, le canal rouge. Si aucun partage d'information entre les drones n'a lieu, le drone \mathbb{D}_1 ne va pas céder ses utilisateurs qui sont aussi couverts par \mathbb{D}_2 et il ne se déplacera pas pour découvrir des nouveaux utilisateurs. Ainsi, pour assurer une meilleure couverture du voisinage, les drones devront se partager les utilisateurs.

Pour effectuer un partage d'utilisateurs efficace, nous avons envisagé un mécanisme simple où les drones qui partagent le même voisinage échangent des informations sur le nombre d'utilisateurs qu'ils couvrent. Si un écart est détecté, le drone couvrant le plus d'utilisateurs va en transférer une partie à l'UAV moins chargé, équilibrant ainsi l'utilisation des ressources. Pour éviter le basculement d'utilisateurs entre les drones, ceux-ci ne peuvent pas décharger des utilisateurs, si l'écart entre le nombre d'utilisateurs couverts est inférieur à un. Avec le partage de charge, figure 4.7b, le drone \mathbb{D}_1 va décharger quelques utilisateurs sous la couverture du drone \mathbb{D}_2 , en découvrant ainsi des nouveaux.

Du point de vue technique, une potentielle solution pour effectuer le transfert d'utilisateurs entre deux PAs utilisant deux canaux différents, est d'utiliser la proposition faite dans [115]. *BIGAP* utilise les messages *CSA* pour déclencher le changement de point d'accès pour les utilisateurs. Pour ce faire, le point d'accès couvrant l'utilisateur qui devra changer de PA, envoie un message *CSA*, en mode unicast, avec le canal du nouveau drone qui devra le couvrir. La réception de ce

message déclenche le changement au niveau de l'utilisateur qui bascule sur le canal souhaité.

4.3.4 Analyse numérique du multi-canal

Vus les canaux disponibles en Wi-Fi, nous avons considéré que notre réseau dispose ainsi d'un nombre de 9 canaux, disponibles pour une utilisation extérieure dans la bande 5 GHz, permettant ainsi un voisinage de neuf drones sans que les utilisateurs subissent d'interférences. Dans la figure 4.8 nous exposons les résultats fournis par notre simulateur une fois le mécanisme de sélection du canal introduit. En regardant le pourcentage d'utilisateurs non-interférés par des drones voisins associés à un drone, nous observons clairement que l'utilisation de plusieurs canaux, choisis de manière dynamique, augmente les performances de la solution de placement que nous proposons.

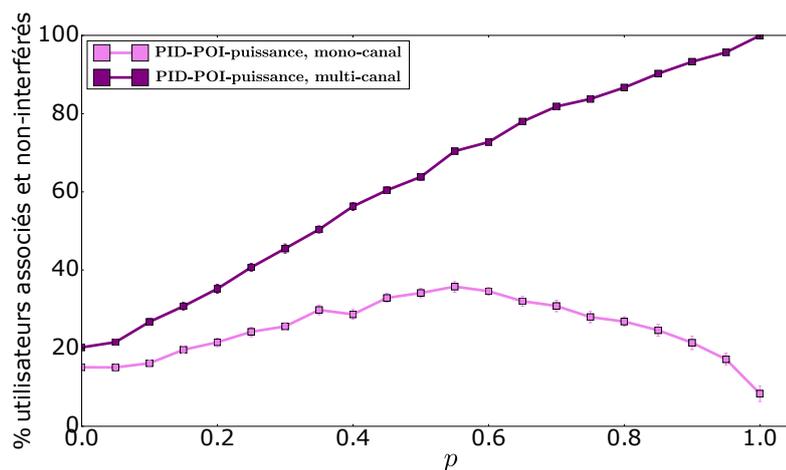


FIGURE 4.8 Pourcentage d'utilisateurs associés et non-interférés avec et sans plusieurs canaux Wi-Fi.

Pour des scénarios denses, où le nombre d'utilisateurs à couvrir dépasse la capacité cumulée sur les neuf canaux du réseau, des interférences peuvent apparaître. Dans ces situations, une cohabitation des deux solutions que nous avons proposées pourra être envisagée. En augmentant la charge virtuelle attribuée à un UAV, nous pouvons éviter que le même canal soit utilisé plusieurs fois dans le même voisinage car les drones utilisant les mêmes fréquences se repousseront. Bien que simple, ce mécanisme est très efficace car il offre une gestion complètement décentralisée des

canaux, le réseau pouvant être discontinu, ainsi, il n'y a pas besoin d'une entité centrale pour gérer la coordination des canaux utilisés.

Par la suite, nous nous intéressons aux résultats fournis par l'analyse mathématique du problème de placement et à la comparaison entre un placement optimal et celui proposé par PID.

4.4 Comparaison avec l'optimal

Cette section sera dédiée à la comparaison des résultats fournis par notre simulateur avec des résultats analytiques obtenus grâce au modèle mathématique que nous avons décrit dans le chapitre 3.6. Comme nous l'avons déjà présenté précédemment, les temps de calcul du solveur peuvent être très élevés, dépendants du nombre de drones et du problème auquel nous nous intéressons.

Nous avons donc été contraints de revoir le scénario sur lequel les simulations ont été effectuées. Ainsi, nous avons dû limiter le nombre de drones pour que le temps de calcul reste acceptable. Pour les résultats présentés dans cette section, nous avons pris en compte $N_D = 5$ et $N_U = 30$ sur une grille de $L = 1000$, $\ell = 1000$.

Puisque les temps de résolution du modèle en escalier et celui fondé sur la puissance sont trop élevés, nous n'avons pu comparer le placement initial des drones que par rapport au modèle binaire en effectuant pour chaque valeur de p que deux essais.

4.4.1 Analyse des résultats

Pour que l'analyse soit cohérente, les positions des utilisateurs pour chaque essai et pour chaque valeur de la probabilité d'attractivité ont été générées en amont, étant par la suite utilisées comme valeur d'entrée de notre simulateur ainsi que du solveur. Dans la figure 4.9 nous montrons la comparaison entre la solution optimale et notre simulation. On peut remarquer que l'écart relatif est assez significatif entre **OPTI-BINAIRE** et **PID-(0,0)-BINAIRE**, inférieur à -50% pour les faibles valeurs de p , tandis que pour un départ des drones directement du POI, notre **PID-POI-BINAIRE** s'approche du placement optimal, atteignant un écart légèrement plus faible, -33% quand la probabilité d'attractivité est de $0,25$ et seulement de -14% quand $p = 0,75$.

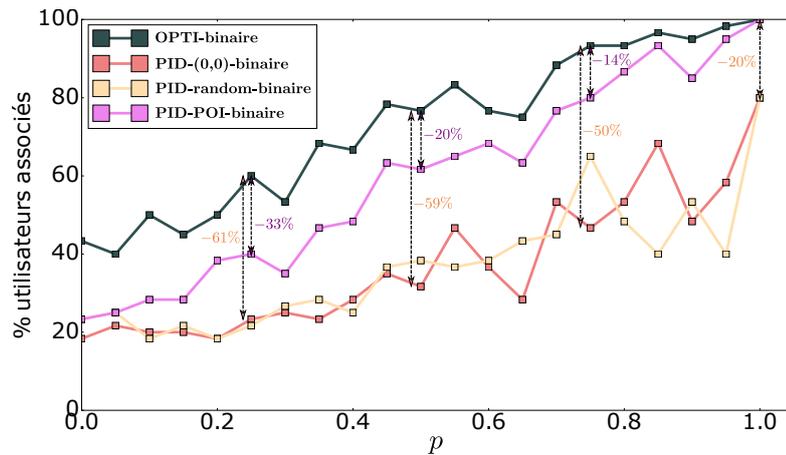


FIGURE 4.9 Comparaison du pourcentage d'utilisateurs associés entre le modèle **PID-POI** et une solution optimale **OPTI-BINAIRE**.

Ces résultats peuvent paraître surprenants, surtout pour des valeurs de p inférieures à 0,5. Jusqu'à présent nous avons jugé que lorsque les drones partent des points d'intérêt le pourcentage d'association devrait être assez élevé pour un scénario donné, car les utilisateurs se trouvent souvent autour. Pourtant, le modèle mathématique nous montre qu'une meilleure couverture des utilisateurs peut être trouvée.

Nous avons donc étudié le placement proposé par la solution optimale pour comprendre cet écart important avec PID, jusqu'à présent, meilleure méthode de placement. Pour rappel, les drones partaient d'un point initial, ayant comme but de couvrir les utilisateurs rencontrés sur le chemin. Un drone interrompait son itinéraire dès la découverte du premier utilisateur, s'arrêtant ainsi pour le couvrir.

Il faudrait d'abord comprendre que pour des valeurs p inférieures à 0,5, les utilisateurs sont assez dispersés, en effet plus d'utilisateurs se trouvant en dehors des POIs que à côté. En fonction des positions des points d'intérêt, aléatoirement choisies à chaque simulation, il se peut que deux ou plusieurs se retrouvent à proximité. Ainsi, des groupements d'utilisateurs peuvent se former en dehors des points d'intérêt, affectés à la base aux POIs qui se retrouvent aux environs.

Dans ce cas, les UAVs s'arrêtent pour couvrir un ou deux utilisateurs isolés, retrouvés à côté des points d'intérêt, ce qui donne forcément un pourcentage d'association plus réduit, comme nous pouvons observer dans la figure 4.10. De plus, dans le cas du placement optimal, l'algorithme recherchera la plus grande

foule pouvant être couverte par un drone, possiblement éloignée d'un POI, \mathbb{P}_j sur la figure, augmentant ainsi le pourcentage d'association. Comme dans nos simulations les drones n'ont pas d'informations concernant les positions exactes des utilisateurs, ils ne peuvent pas atteindre une couverture optimale.

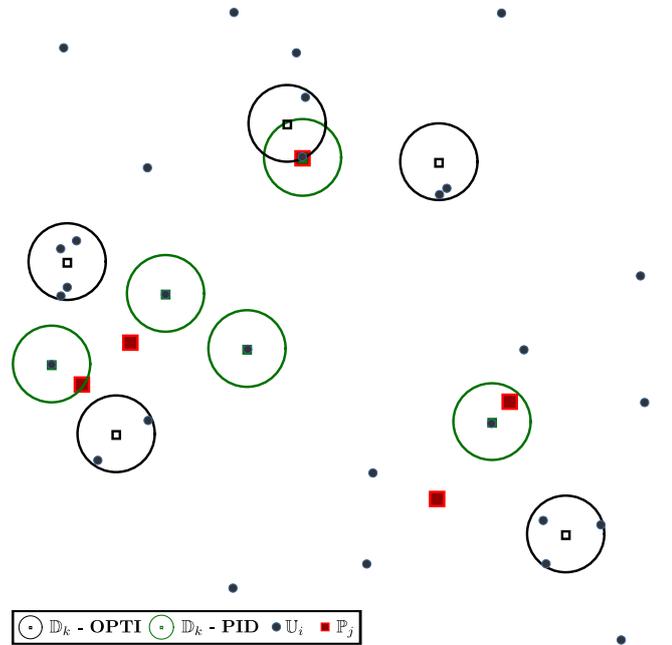


FIGURE 4.10 Comparaison du placement des drones **PID-POI** et celui analytique **OPTI-BINAIRE**.

En conséquence, à l'aide des dernières informations obtenues, nous avons envisagé une possible amélioration de notre proposition de modèle de placement que nous allons décrire par la suite.

4.4.2 Amélioration de la couverture

En ce qui concerne les résultats présentés ci-dessus, nous devons réfléchir à une meilleure façon de rechercher des utilisateurs pour identifier des éventuels phénomènes de regroupement. Jusqu'à présent, les drones avaient commencé leur périple en partant des points d'intérêt. Quand au moins un utilisateur était détecté, le drone arrêta la recherche pour le couvrir. En même temps, nous ne pouvons pas espérer faire mieux, dans la mesure où les drones n'ont pas de connaissance sur la position des utilisateurs, la seule information disponible étant la position des

points d'intérêt. Pour aller plus loin dans la couverture des utilisateurs il faudrait que les UAVs obtiennent des indications supplémentaires sur les utilisateurs.

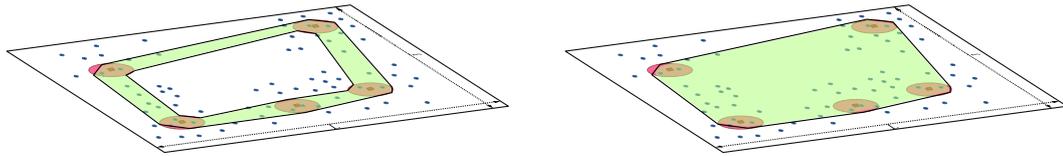
Pour porter à la connaissance du modèle de placement des données complémentaires sur les utilisateurs, des indications additionnelles doivent être recueillies, plusieurs solutions se dégagent. Une première est inspirée des résultats de recherche présentés dans l'état de l'art. En fonction du scénario dans lequel le réseau sera mis à l'œuvre, l'opérateur de celui-ci pourrait déjà avoir des indices sur les utilisateurs grâce à des études démographiques effectuées par les opérateurs de téléphonie mobile, par exemple. Il est évident que de tels apports ne doivent pas être négligés, car ils peuvent donner une base pour le modèle de placement ainsi favorisant l'augmentation de la couverture. Néanmoins, ces expertises pourront ne pas être à jour. Il va de soi que nous ne pouvons pas espérer augmenter la couverture juste en se fondant sur ces informations car leur fiabilité ne peut pas être assurée dans tous les scénarios.

Par conséquent, une autre piste possible sera de "spécialiser" (au moins temporairement) certains drones qui se chargeront de patrouiller la zone à couvrir pour rechercher en permanence des utilisateurs. En apparence, cette solution peut sembler facile, mais il ne faut pas perdre de vue le fait que, d'un côté la zone à couvrir peut être très étendue impliquant une consommation d'énergie élevée pour effectuer un balayage complet et d'un autre côté, cette solution impliquera l'utilisation de drones supplémentaires qui pourra augmenter les coûts opérationnels de ce réseau.

Certainement, pour améliorer la couverture il est nécessaire que ceux-ci doivent être recherchés. Une solution plus astucieuse sera d'utiliser les drones qui vont assurer la couverture et de parcourir une zone plus restreinte, par exemple délimitée par les POIs. De cette façon un drone peut facilement découvrir des éventuelles foules éloignées des points d'intérêt, remontant cette information au niveau du réseau. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'utiliser des drones supplémentaires ou d'augmenter la consommation énergétique.

4.4.3 Découverte étendue des utilisateurs

C'est cette idée que nous retiendrons pour améliorer la couverture de PID. Elle nous semble la plus adaptée avec un compromis entre une consommation



(a) Représentation du parcours en circuit. (b) Représentation du parcours aléatoire.

FIGURE 4.11 Parcours de recherche des utilisateurs.

d'énergie élevée et une connaissance parfaite, à un instant donné, des positions des utilisateurs. Par conséquent, nous avons implanté dans notre simulateur un mécanisme de recherche d'utilisateurs qui permet à un drone de rechercher le plus grand nombre d'utilisateurs se situant à proximité, en n'utilisant que la position des POIs connue en avance par les drones.

De ce fait, nous avons introduit cette amélioration dans notre modèle pour lui permettre la découverte des utilisateurs. Chaque drone survolera donc les points d'intérêt à la recherche des utilisateurs, sans s'arrêter au dessus du premier trouvé. Il volera en ligne droite au dessus de chaque POI en prenant note de la position des utilisateurs. Après un premier tour, et en faisant une analyse rapide des positions enregistrées, le drone décidera quelle sera la zone à couvrir, en prenant celle contenant le plus grand nombre d'utilisateurs, parmi celles trouvées. Il se déplacera par la suite vers cette zone pour couvrir les utilisateurs. Dans le cas où cette zone a déjà été couverte, il calculera la nouvelle plus grande zone à couvrir (un nouveau plus grand nombre d'utilisateurs), et fera un tour à la recherche de cette nouvelle zone. Pour des raisons d'économie d'énergie, nous pouvons envisager, pour les cas où le groupe ciblé a déjà été couvert, qu'un drone s'arrêtera dès la découverte d'un nouveau groupe composé d'un pourcentage prédéfini du nombre maximal cherché.

Deux manières de déplacement entre les différents POIs se dégagent. Une première, plus simple à mettre en œuvre, consiste à faire tourner les drones en circuit, en passant par chaque point d'intérêt, comme illustré dans la figure 4.11a. Une deuxième solution sera de laisser chaque drone construire son propre trajet pour la recherche, en choisissant aléatoirement l'ordre de survol de chaque POI comme montré dans la figure 4.11b. La deuxième technique présente l'avantage d'augmenter la zone observée. Dans les représentations de la figure 4.11, nous avons illustré en vert la zone dans laquelle les drones vont chercher les utilisateurs en

fonction du mécanisme choisi. En effet, le fait de choisir aléatoirement l'ordre de passage, fera que les UAVs peuvent survoler, par exemple, deux points d'intérêt situés à des coins opposés à la suite, traversant aussi un espace où il n'y a pas de POI.

De cette façon, dans PID, chaque UAV construira son propre trajet en choisissant de manière aléatoire l'ordre dans lequel les POIs sont survolés. De plus, en échangeant ces informations avec les autres drones, chacun d'eux aura son propre modèle de recherche unique, maximisant ainsi l'espace de recherche. Un problème possible peut découler de ce mécanisme. Bien sûr, cela permettrait d'approcher le ratio d'association à la valeur optimale, mais comme plusieurs drones volent en même temps, la plus grande foule aurait déjà pu être découverte par plusieurs drones et couverte par un autre UAV. Pour pallier ce phénomène, le drone qui arrive en deuxième pour couvrir cette zone fera un tour afin de trouver une autre foule à couvrir.

4.4.4 Performances de l'amélioration

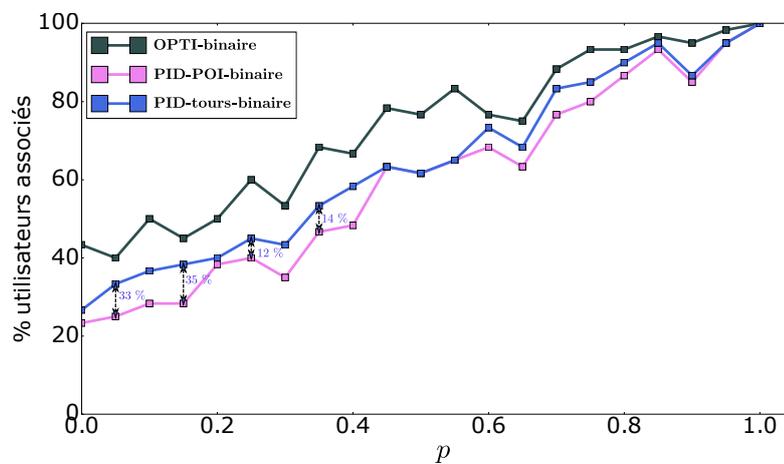
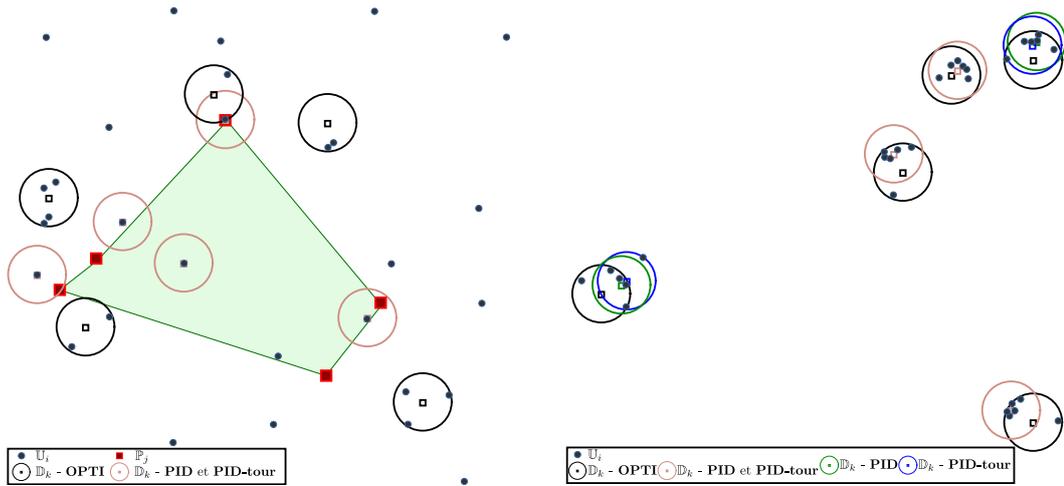


FIGURE 4.12 Comparaison entre une solution optimale **OPTI-BINAIRE** et notre modèle amélioré du pourcentage d'utilisateurs associés.

Nous avons effectué des simulations afin d'évaluer cette nouvelle amélioration de PID. Les simulations ont été effectuées dans les mêmes conditions que celles décrites dans la section 4.4 pour qu'une comparaison avec la proposition de placement optimal puisse être faite. Dans la figure 4.12, nous décrivons les résultats de la



(a) Placement des drones pour $p = 0,05$. (b) Placement des drones pour $p = 0,80$.

FIGURE 4.13 Représentation visuelle du placement des drones en utilisant **OPTI-BINAIRE** et **PID-POI-BINAIRE** sans et avec la recherche des utilisateurs.

simulation de ce nouveau modèle de recherche en comparaison avec l'algorithme initial et la solution optimale. Nous remarquons que les résultats sont globalement meilleurs que l'algorithme de placement initial. Dans certains cas, en raison des positions des utilisateurs, le modèle de recherche peut ne pas offrir de meilleurs résultats que la proposition initiale car certains d'entre eux pourraient être situés en dehors des zones de recherche, ou pour des valeurs élevées de p il n'y a pas forcément besoin de chercher les utilisateurs car ils se retrouvent déjà autour des points d'intérêt.

De plus, pour mieux comprendre le placement des drones et donc les résultats, nous avons examiné le placement des drones donné par le solveur et notre simulateur de manière visuelle, figure 4.13. En trait noir, nous avons représenté le placement offert par le solveur, en trait vert la position du drone offerte par le modèle initial, en trait bleu la position du drone en utilisant le mécanisme de recherche et en trait orange le placement du drone lorsque la solution initiale et le mécanisme de recherche offraient la même position pour un UAV. Les utilisateurs sont représentés par des cercles noirs et les points d'intérêt par les carrés rouges.

Pour mieux comprendre les résultats, nous avons décrit, dans la figure 4.13a, le placement des drones pour ce cas précis. Les POIs délimitent la zone de recherche que nous avons fait figurer en vert pâle. Étant donné que les drones ne font que

circuler entre les POIs et en fonction de leurs positions respectives, il est possible que certains utilisateurs ne soient jamais détectés par un drone. C'est particulièrement le cas pour $p = 0,05$, où les groupes d'utilisateurs sont situés en dehors du chemin de recherche, rendant leur détection difficile.

Dans la figure 4.13b, nous décrivons les positions des drones pour $p = 0,80$. Dans ce cas, on pourrait remarquer que les conclusions sur le placement des trois méthodes sont équivalentes. Le solveur, offrant les positions optimales pour ce scénario, est parvenu à couvrir 29 utilisateurs au total, soit deux de plus que la méthode de recherche qui n'a pas trouvé pendant la recherche les utilisateurs légèrement éloignés du point d'intérêt. D'autre part, en ne recherchant que des utilisateurs autour du point d'intérêt, notre proposition initiale n'a réussi à trouver que 25 utilisateurs.

Globalement, ce nouvel algorithme de placement des drones montre un gain en termes de couverture, comme le prouve la figure 4.12. L'intérêt de cette solution améliorée réside dans les cas où la valeur de p est faible. Cela correspond aux cas où des drones restent bloqués par des utilisateurs isolés, ce qui est assez commun pour ces valeurs de p . En appliquant cet algorithme pour des valeurs comprises entre 0 et 0,50, nous obtenons un gain relativement important en termes de couverture.

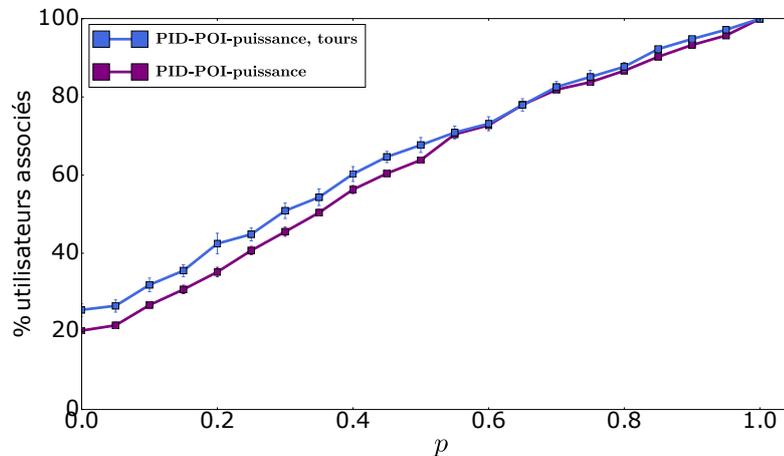


FIGURE 4.14 Comparaison du pourcentage d'association entre **PID-POI-PUISSANCE** et **PID-POI-PUISSANCE** amélioré.

À plus grande échelle, la figure 4.14 nous montre que avec 500 utilisateurs et 10 drones, les mêmes tendances sont observées. L'algorithme de recherche offre une amélioration convaincante de la couverture lorsque les UAVs explorent la zone

Scénario	Probabilité p	N_D	N_U
1	0,00	2	10
2	0,25	2	10
3	0,50	2	10
4	0,75	2	10
5	1,00	2	10

TABLEAU 4.1 Scénarios de test pour le modèle tenant compte du débit.

concernée, car les drones sont capables de découvrir plus d'utilisateurs potentiels. Nous pensons que cet algorithme ne devra être appliqué que dans le cas où la probabilité d'attractivité p est faible, comprise entre 0 et 0,50 car pour des valeurs supérieures, le modèle amélioré atteint les mêmes performances que celui proposé initialement. Cette décision peut être prise par l'opérateur de réseau au cas par cas, évitant ainsi des déplacements inutiles des drones.

4.4.5 Prise en compte du débit

Dans cette partie, nous vous proposons une brève analyse de PID en le comparant avec une solution optimale qui cherche à maximiser le débit atteignable par un utilisateur.

Comme nous l'avons déjà évoqué en 3.6, nous avons présenté une variante du modèle mathématique qui a pour but de maximiser le niveau de débit qu'un utilisateur peut atteindre, en fonction de sa position par rapport au drone qui le couvre. Malheureusement, comme nous l'avons souligné, ce modèle analytique est très lourd en terme de temps de calcul, nous obligeant à utiliser des scénarios restreints afin d'obtenir des résultats.

Ainsi, pour cette analyse, nous avons réduit le nombre d'utilisateurs et de drones, afin d'obtenir des résultats du modèle mathématique. Dans le tableau 4.1 nous présentons cinq scénarios sur lesquels nous avons fait tourner le solveur et notre simulateur. D'un côté, nous avons regardé la somme des plafonds de débits que les utilisateurs peuvent espérer, présenté dans la figure 4.15. Nous remarquerons clairement que la solution optimale est plus agressive, car elle va chercher à couvrir les utilisateurs dans les meilleures conditions afin de maximiser le débit offert. Des écarts relatifs assez importants sont à remarquer, variant entre 64 % pour le

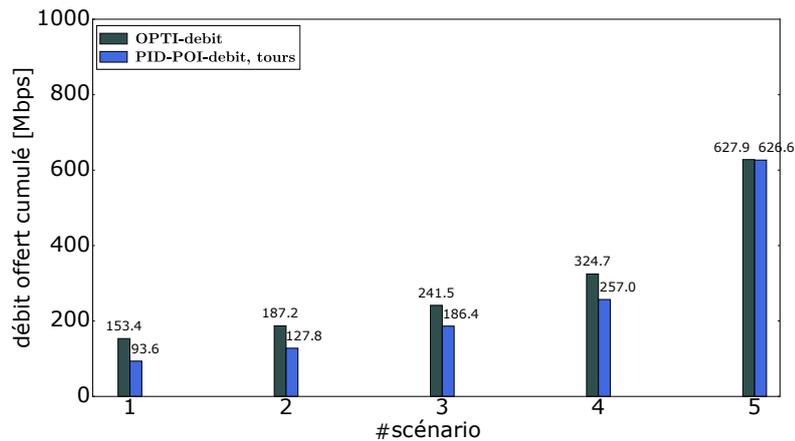


FIGURE 4.15 Comparaison du débit maximum offert aux utilisateurs entre le placement optimal **OPTI-DEBIT** et notre modèle **PID-POI-DEBIT** amélioré.

premier scénario et 26 % pour le quatrième. Nous rejoignons les hypothèses faites dans la section 3.6.1, où nous avons soulevé la question d'équité du modèle de placement. Certes, le modèle mathématique offre une meilleure qualité de service aux utilisateurs, ceux couverts ayant des meilleures conditions de communication que ceux couverts par notre modèle proposé **PID-POI-DEBIT**. En revanche, cela arrive au détriment du taux d'utilisateurs couverts. En effet, son but principal n'est pas de chercher à couvrir le plus grand nombre, mais d'offrir les meilleures conditions en terme de débit, même au détriment de la couverture.

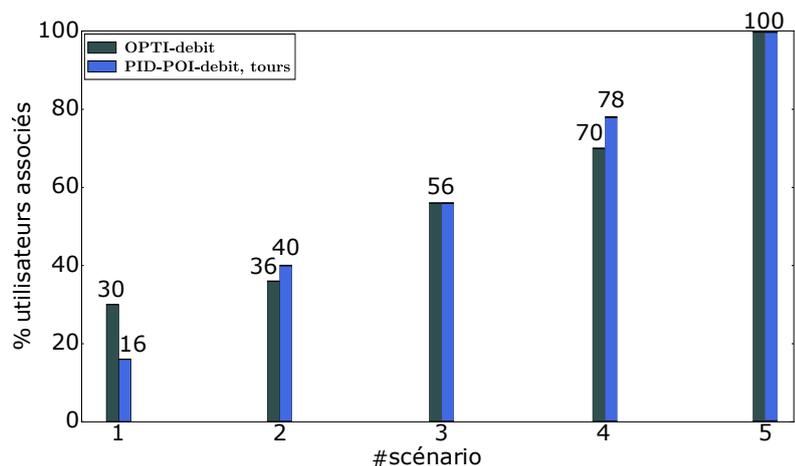


FIGURE 4.16 Comparaison du pourcentage d'association des utilisateurs entre le placement optimal **OPTI-DEBIT** et notre modèle **PID-POI-DEBIT** amélioré.

Dans la figure 4.16 nous avons représenté le pourcentage d'association des utilisateurs pour les cinq scénarios envisagés. Effectivement, en terme de couverture des utilisateurs, PID est davantage bienveillant envers les utilisateurs. Pour des faibles valeurs de p la solution optimale est capable de trouver les plus grands groupes, qui peuvent ne pas être sur le chemin parcouru par notre modèle. Évidemment, PID essaiera d'offrir la meilleure qualité de service possible, en se concentrant au maximum sur les utilisateurs couverts, mais il ne négligera pas un utilisateur découvert juste pour se trouver dans des meilleures conditions de communication pour un autre.

La question *Desservir mieux ou desservir plus ?* reste ouverte. L'opérateur du réseau devra faire le choix entre couvrir de manière idéale moins d'utilisateurs (envisageable pour couvrir les intervenants lors d'une catastrophe naturelle, par exemple), ou offrir les meilleures conditions de transmission faisables, mais en couvrant en même temps tous les utilisateurs que le modèle de placement à pu découvrir.

4.5 Mobilité des utilisateurs

Tout au long de ce manuscrit, nous avons souligné l'importance de la dynamique qu'un mécanisme de placement, comme PID, doit présenter devant des utilisateurs mobiles. En effet, les scénarios de déploiement d'un réseau ad hoc fondé sur des drones impliquent, à part un nombre potentiellement élevé d'utilisateurs à couvrir, la prise en charge du déplacement de ces utilisateurs. En fonction des scénarios, les utilisateurs peuvent être amenés à se déplacer régulièrement, comme dans le cas des manifestations sportives ou des rassemblements. Alors, une caractéristique importante d'un tel réseau est son adaptabilité à la mobilité.

Notre modèle de placement a été conçu pour intégrer le suivi des utilisateurs. L'utilisation des forces virtuelles comme mécanisme de détection des utilisateurs et de placement fait que, en cas de mouvement des utilisateurs, un drone peut être entraîné dans le mouvement si la force d'attraction des utilisateurs en déplacement, exercée sur l'UAV, est plus forte que celle créée par les utilisateurs restant sur place, le cas échéant. Avant d'analyser le comportement de PID dans ces cas de figure, il est nécessaire de mettre en place un modèle de mobilité des utilisateurs, adaptée à nos scénarios. Un bref état de l'art sur les modèles de mobilité sera présenté par la suite.

4.5.1 Les modèles de mobilité

Au fil du temps, la modélisation de la mobilité est devenue un sujet à part entière, l'utilisation d'un modèle de mobilité qui imite un scénario réel étant importante pour la validation de nouveaux protocoles et applications pour les réseaux ad hoc, par exemple. Un nombre important de modèles mathématiques de mobilité se trouve actuellement dans la littérature, même si la similarité avec les mouvements des utilisateurs dans la vie réelle est parfois faible, comparé à la collecte de traces, de tels modèles peuvent être appliqués à un nombre important de nœuds.

Plusieurs types de modèles de mobilité peuvent être trouvés dans la littérature, les modèles de mobilité des individus où la mobilité des nœuds est indépendante les uns des autres, et les modèles de mobilité corrélés (ou de groupes) pour lesquels le mouvement d'un nœud dépend de la mobilité d'autres nœuds. Les modèles de mobilité peuvent être subdivisés encore en modèles de mobilité aléatoire, modèles avec dépendance temporelle ou modèles avec dépendance spatiale.

Dans le modèle de mobilité aléatoire, les nœuds se déplacent librement et sans restriction. Tous les attributs de mobilité tels que la vitesse, la direction et la destination sont sélectionnés de manière aléatoire et indépendamment de la sélection précédente. Par conséquent, ces modèles de mobilité sont généralement appelés sans mémoire. Un modèle de mobilité aléatoire des points a été proposé pour la première fois par Johnson et al. [116], appelé *Random Waypoint Model*. Dans ce modèle, un nœud choisit de manière aléatoire une nouvelle destination (dans une zone donnée) et une vitesse uniformément répartie dans un intervalle de vitesses autorisées. Le nœud se déplace ensuite vers la destination choisie à la vitesse sélectionnée pendant un laps de temps spécifié. Une fois le déplacement fini, il sélectionne à nouveau une destination et une vitesse aléatoires et continue de la même manière.

Le modèle *Random Walk* [117] a été proposé à l'origine sous forme de mouvement brownien pour imiter le mouvement imprévisible de particules microscopiques en suspension dans un fluide. Comme certains nœuds mobiles sont supposés se déplacer de manière inattendue, un nœud se déplace vers un nouvel emplacement en choisissant au hasard une direction et une vitesse de déplacement. Chaque mouvement dans ce modèle se produit soit durant un intervalle de temps constant, soit sur une distance constante parcourue, à la fin de laquelle une nouvelle direction

et une nouvelle vitesse sont calculées.

En raison de la nature irréaliste du mouvement des nœuds dans les modèles aléatoires, Bettstetter [118] propose une nouvelle approche, appelée *Smooth Random Mobility Model*. Ce modèle propose un changement progressif et en douceur de la vitesse et la direction des nœuds au lieu d'un virage serré et d'une accélération et décélération soudaines. Par conséquent, la vitesse de croisière est choisie avec une probabilité élevée parmi les valeurs de l'ensemble des valeurs préférées. Le changement de la valeur de croisière suit une distribution uniforme qui s'applique sur le reste des valeurs possibles. La fréquence de changement de vitesse suit un processus de Poisson. La vitesse est ainsi modifiée progressivement suivant une accélération ou une décélération, uniformément repartis dans un intervalle de valeurs possibles. Pour chaque intervalle de temps les changements de direction se font par incréments jusqu'à l'arrivée du nœud dans la bonne direction. Ainsi, dans ce modèle, la vitesse et la direction du mouvement sont en partie décidées par leurs valeurs précédentes.

Quant aux modèles de mobilité corrélés, plusieurs propositions existent dans la littérature. Les modèles de mobilité des groupes sont ceux dans lesquels les nœuds ont tendance à se déplacer ensemble et à se comporter de manière coopérative, ayant en général une destination commune, les nœuds se détachant rarement du groupe. *Heterogeneous Random Walk* [119] a été proposé pour la simulation de réseaux en *clusters*. Dans ce modèle, les nœuds sont répartis en groupes, représentés par des cercles. Ils effectuent une marche aléatoire dans ce cercle avec des vitesses hétérogènes.

Une proposition intéressante a été faite dans [120], appelée *Reference Point Group Mobility Model*. Dans cet article, les auteurs proposent que les nœuds soient divisés en groupes, chaque groupe ayant un chef. Le mouvement de celui-ci caractérise complètement le mouvement du groupe de nœuds correspondant, y compris leur direction et leur vitesse. Les nœuds se déplacent avec une variation distribuée uniformément en rapport avec la vitesse et la direction du chef de groupe.

Au vu des scénarios de déploiement que nous avons envisagés, nous considérons qu'un modèle de mobilité corrélée est plus adapté pour représenter le déplacement des utilisateurs dans notre cas. Puisque dans les cas d'application les utilisateurs sont censés être regroupés autour des points d'intérêt, il est cohérent d'imaginer que ceux-ci privilégieront de se déplacer en groupe, un modèle fondé sur la proposition

présentée dans [120] semble judicieux. Par la suite, nous allons introduire le modèle de mobilité des utilisateurs que nous avons appliqué dans nos simulations.

4.5.2 PID face à la mobilité des utilisateurs

Pour évaluer le comportement de PID face à des utilisateurs en mouvement, nous avons choisi de mettre en œuvre un modèle de mobilité semblable au *Reference Point Group Mobility Model* [120]. Ainsi, sur \mathfrak{U} , l'ensemble des utilisateurs, un nombre N_G de groupes sera formé, représentant les utilisateurs qui vont se déplacer. Pour qu'un groupe soit constitué correctement, les utilisateurs faisant partie du même groupe doivent se retrouver dans le même voisinage, c'est-à-dire à une distance inférieure à D_G . Pour faire varier le nombre d'utilisateurs qui se déplacent, la probabilité P_G définit le nombre d'utilisateurs qui font partie du groupe, parmi les candidats possibles, choisie uniformément dans l'intervalle $[0, 1]$.

En ce qui concerne le déplacement, un groupe possède une vitesse, V_G , qui sera la vitesse de base des utilisateurs du groupe, et une variation ΔV_{max} , ainsi un utilisateur peut avancer plus ou moins vite que le groupe. Ainsi, la vitesse d'un utilisateur \mathbb{U}_i sera $V_{\mathbb{U}_i} = V_G \pm \Delta V_{max}$. Pour chaque groupe, une destination cible $T_{G(x,y)}$ sera choisie aléatoirement dans l'espace couvert, et chaque utilisateur pourra s'éloigner de cette destination avec $\Delta T_{(x,y)}$, ainsi $T_{(x,y)\mathbb{U}_i} = T_{G(x,y)} \pm \Delta T_{(x,y)}$.

La décision de suivre les utilisateurs n'est pas anodine. Avec un nombre de drones limité, l'intérêt majeur reste de couvrir le plus d'utilisateurs possible. D'un côté, si les drones ne suivent pas les utilisateurs, le modèle assure au moins la couverture minimale, des utilisateurs déjà trouvés et qui restent sur place, en espérant que ceux qui se déplacent rentrent dans la zone de couverture d'un autre drone. En fonction des scénarios et dans le cas où les points d'intérêt ont été bien identifiés en amont, nous pouvons penser que les utilisateurs se déplacent vers un autre POI.

De l'autre côté, si les UAVs continuent à être attirés par les attroupements d'utilisateurs en déplacement, cela offrira une couverture satisfaisante, au détriment des utilisateurs restant sur place, mais offrant en plus aux drones la possibilité de découvrir durant le suivi des potentiels nouveaux groupes d'utilisateurs. Dans ce cas, le drone pourra s'arrêter pour les couvrir, si leur force d'attraction est plus grande, au détriment des utilisateurs mobiles, augmentant ainsi la couverture globale. De

plus, si la quantité de drones disponibles le permet, il pourra les informer pour qu'un autre prenne le relais et continue à suivre les utilisateurs.

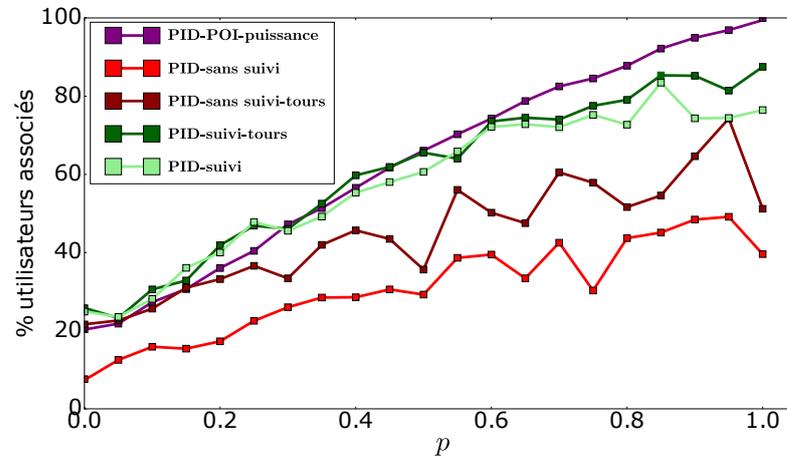


FIGURE 4.17 Comparaison de la couverture pour les solutions de suivi des utilisateurs en cas de mobilité.

Nous avons mis à l'épreuve notre modèle pour analyser son comportement face à la mobilité en comparant le taux de couverture des utilisateurs. Nous nous sommes intéressés à l'observation du taux de couverture dans le cas où les drones suivent les utilisateurs ou, au contraire, restent statiques à la position trouvée initialement sans s'intéresser aux utilisateurs mobiles. Nous avons mis comme référence le placement étudié jusqu'à présent (utilisateurs statiques), **PID-POI-PUISSANCE**.

Une première observation se dégage après avoir implanté ce modèle dans notre scénario : PID est capable de suivre les utilisateurs quand la force d'attraction des utilisateurs en déplacement, exercée sur l'UAV, est plus forte que celle créée par les utilisateurs restant sur place. Quant aux valeurs numériques, nous montrons dans la figure 4.17 les taux de couverture dans les cas évoqués.

Pour des raisons de comparaison, dans la figure évoquée nous avons représenté en violet le cas statique, où les utilisateurs ne bougent pas. Nous pouvons observer en comparant les deux courbes **PID-SANS SUIVI** et **PID-SUIVI** que forcer les drones à rester sur leurs positions initiales n'a pas d'intérêt. En effet, PID est capable grâce au principe des forces virtuelles de décider s'il y a un intérêt de se déplacer pour suivre les utilisateurs, ou pas, comme présenté précédemment, l'écart en terme de couverture entre les deux versions étant très important. En revanche, quand les UAVs sont libres de être influencés par l'attraction des forces nous observons que

pour des probabilités d'attractivité des points d'intérêts faibles, $p < 0,5$, le taux de couverture se rapproche, voire dépasse celui des scénarios où les utilisateurs sont statiques. Dans ces cas les utilisateurs se trouvent plus à l'extérieur des POIs qu'à côté. De ce fait, lors du déplacement, des groupes que les drones vont découvrir seront créés, augmentant ainsi la couverture.

Cependant, pour des probabilités d'attractivité plus élevées $p \geq 0,5$, donc un nombre plus important d'utilisateurs à côté des points d'intérêt, la mobilité va faire baisser le taux de couverture, par rapport au cas statique, baisse influencée par P_G , le nombre d'utilisateurs qui vont se déplacer. En effet, si un nombre faible d'utilisateurs va se déplacer, en s'éloignant du point d'intérêt, le drone ne sera pas en mesure de les suivre puisque la force d'attractivité du groupe partant sera plus petite que celle émise par les utilisateurs restant sur place. En conséquence, l'UAV couvrira la plus grande proportion d'utilisateurs qui lui est visible, mais qui est moins grande que dans le cas où les utilisateurs restent statiques, faisant ainsi baisser le taux de couverture global.

Dans ces situations, où le taux de couverture, après le départ des utilisateurs, est moins important que celui initial il serait intéressant que les drones appliquent la méthode de recherche des foules, présentée précédemment dans la section 4.4.2. Il est à noter que, après le départ des utilisateurs, le taux de couverture d'un drone peut augmenter si des utilisateurs venant d'ailleurs se déplacent dans la zone de couverture d'un drone. Ainsi, **PID-SUIVI-TOURS** implémente cette solution améliorée qui montre un taux de couverture meilleur que le précédent. Néanmoins, il est évident qu'une couverture de 100 % ne pourra pas être atteinte car la mobilité des utilisateurs altère la probabilité d'attractivité des points d'intérêt, les utilisateurs se trouvant plus éparpillés dans la zone de couverture initialement prévue par le modèle de placement.

4.6 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons regardé en détail le comportement de notre proposition de placement des drones pour assurer la couverture des utilisateurs à travers des simulations via un modèle que nous avons implanté.

Nous avons d'abord effectué une première analyse du placement proposé pour obtenir de premiers résultats. Suite à cette analyse, nous avons observé que les

points d'intérêt peuvent jouer un rôle primordial dans le placement des drones, ainsi, nous avons décidé de les intégrer dans le modèle de placement. Il est à rappeler que les UAVs n'ont aucune connaissance précise sur les positions des utilisateurs, la seule information donnée potentiellement en entrée étant l'emplacement des POIs. De plus, nous avons introduit un mécanisme qui augmente le rapport d'association des utilisateurs au réseau, la gestion des interférences, permettant de rendre meilleure la qualité de la connexion, en proposant l'utilisation des canaux multiples, agnostique de la technologie sans fil utilisée. Tout cela étant fait de manière décentralisée, permettant à chaque drone participant au réseau de choisir de manière distribuée le meilleur canal à utiliser en tenant compte des interférences locales.

En outre, nous avons mis à l'épreuve PID en la comparant avec une solution optimale. En analysant la comparaison, nous constatons que notre solution fonctionne très bien, même par rapport à une méthode basée sur la localisation comme le placement optimal qui a une vision complète des utilisateurs. Les deux comparaisons auxquelles nous avons procédé sont liées au pourcentage d'association et aux conditions de débit que le réseau peut offrir à chaque utilisateur. L'avantage primordial est que PID n'exige aucune information de localisation exacte et qu'aucun calcul centralisé n'est nécessaire pour déployer les drones, contrainte forte que nous avons imposée à notre modèle.

Néanmoins, une deuxième amélioration a été proposée pour perfectionner notre proposition de placement. Nous avons montré que la probabilité d'attractivité des points d'intérêt, p , est un paramètre important, mais sa valeur sera probablement inconnue dans la plupart des scénarios. De ce fait, nous proposons que dans ces cas, les drones cherchent en début de déploiement des foules à couvrir en effectuant des tours de manière aléatoire entre les POIs et en s'arrêtant pour couvrir la plus grande quantité d'utilisateurs trouvée. Améliorer les performances pour les faibles valeurs de p reste une question ouverte, en fonction de la position des points d'intérêt, la méthode de placement va chercher dans une zone plus ou moins large.

De plus, nous avons montré que le principe d'attractivité et de répulsion mis en œuvre dans PID est tout à fait capable de suivre les utilisateurs en cas de mobilité. Même si le taux de couverture peut baisser dans le cas mobile par rapport à des utilisateurs statiques, cela peut être expliqué par le fait que la probabilité d'attractivité des points d'intérêt est altérée par la mobilité, les utilisateurs se trouvant plus éparpillés dans la zone de couverture initialement prévue. Une

solution pourra être de spécialiser un UAV qui sera chargé de survoler à différents instants de temps la zone à couvrir pour déterminer si les points d'intérêt ont changé d'emplacement (des foules se situant ailleurs que sur les POIs). Ainsi, il transmettra l'information mise à jour aux drones en charge de la couverture qui pourront adapter leur position pour augmenter la couverture. Cette idée pourra être considérée comme un retour à un mécanisme centralisé, mais cela n'est pas le cas. Le drone de reconnaissance mettra juste à jour les informations au niveau des drones, il n'orchestrera pas le placement final, car en cas de forte mobilité, les informations peuvent devenir obsolètes très rapidement.

ROUTAGE ET ÉNERGIE

5.1 Introduction

Les réseaux ad hoc consistent en un ensemble de nœuds communiquant de manière décentralisée, ils ne sont donc pas fondés sur une infrastructure préexistante, aucun élément du réseau n'a une vue d'ensemble sur la topologie. Les paquets sont routés au niveau de chaque nœud vers une destination qui n'est pas forcément connue directement par les nœuds de transit. Comme nous pouvons le constater, le routage est donc une composante fondamentale de ces réseaux de données devant assurer une bonne livraison des messages. Intéressons-nous plus particulièrement à un réseau de drones qui, une fois déployé, doit acheminer les messages en provenance des utilisateurs. Il est alors évident qu'une contrainte forte au sein de ce réseau est représentée par la consommation énergétique des drones. Comme nous le savons déjà, un drone est équipé de batteries ayant pour but d'alimenter les moteurs ainsi que les différents équipements embarqués. Nous considérons ainsi que l'énergie est au cœur du réseau, influençant son bon fonctionnement. Le déchargement de la batterie d'un drone implique que celui-ci sera hors-service et donc il est important que le routage envisagé soit efficace, capable de s'adapter rapidement à ces changements de topologie. La grande vitesse de changement de topologie de ce type de réseau doit être détectée et prise en compte dans le routage, ce qui ajoute à la complexité par rapport à un réseau où la topologie reste statique.

Les changements dans la topologie proviennent naturellement de la mobilité

des drones (voire de celle des utilisateurs). Lorsque le mouvement d'un drone a pour conséquence la rupture d'un ou plusieurs liens, il est important de chercher à en minimiser les effets. Une solution peut être apportée par le remplacement d'un drone. Des approches de type DTN [62], peuvent être tout à fait adaptées pour de la collecte de données. Nous nous intéressons ici à maintenir la connectivité du réseau sans interruption pour les flux qui le transitent.

L'idée est la suivante : lorsqu'un drone doit se déplacer et rompre des liens utilisées par la configuration actuelle du routage, un autre drone peut être réquisitionné de sorte à le remplacer. Au delà de la question du choix du drone à utiliser, se pose le problème de la mise en œuvre du remplacement tout en assurant la continuité du service.

Après avoir étudié ensemble les capacités de placement de PID, nous allons examiner ses comportements sur la consommation d'énergie. Nous allons aborder à travers ce chapitre trois points importants relatifs à notre réseau, à savoir, le modèle de consommation énergétique, le remplacement des drones à chaud et le routage. Le défi du premier point est, à travers des simulations, d'observer le comportement énergétique des drones pour déterminer quel est l'impact du déplacement en vol et des communications sur la durée de vie de la batterie. Sans aucune surprise, un drone devra être remplacé au cours de l'exploitation du réseau car la durée de vie du réseau est plus grande que les capacités des batteries. Ainsi, pour ces cas de figure, nous proposons une méthode de remplacement des UAVs en profitant des informations fournies par le modèle d'énergie et du modèle de placement pour effectuer le changement au moment opportun. Nous passons en revue l'analyse de l'impact de cette substitution sur les communications transitant par le réseau et nous apportons une amélioration au niveau du routage pour limiter les effets du remplacement.

D'autres métriques utilisées pour examiner le rendement du modèle de placement, proposé dans le chapitre 3, seront son impact sur la consommation énergétique et l'autonomie de la batterie ainsi que le débit moyen proposé aux utilisateurs. Les premières valeurs seront calculées en utilisant le modèle énergétique que nous allons présenter par la suite, les suivantes, en moyennant le débit fourni à chaque utilisateur. Pour rappel, le débit de chaque utilisateur sera calculé en utilisant le modèle présenté dans la section 3.3.

5.2 Considérations énergétiques

En règle générale, les drones peuvent avoir plusieurs formes et tailles, comme nous l'avons vu précédemment dans le chapitre 1. Prenons l'exemple d'un objet volant qui possède 4 moteurs à hélices qui lui permettent d'effectuer des vols en stationnaire. En contrôlant la vitesse de rotation des hélices du moteur de manière asynchrone, le drone peut effectuer des mouvements sur les 3 axes : tangage (axe latéral), roulis (axe longitudinal) et lacet (axe vertical). Comme nous pouvons l'imaginer, un ordinateur de bord lui est nécessaire pour contrôler les moteurs. De plus, cette unité de calcul a pour objectif de coordonner la trajectoire de l'UAV avec les informations qu'il reçoit des antennes installées à bord pour mettre en œuvre le modèle de déploiement précédemment présenté. Les antennes qui sont installées à bord ont plusieurs objectifs. D'un côté certaines seront en charge d'assurer la communication avec les drones environnants pour l'acheminement des messages à travers le réseau et d'autres peuvent offrir une couverture aux utilisateurs situés au sol.

Nous savons déjà que la durée de vie d'un tel drone est limitée dans le temps. Étant équipé d'une batterie, sa charge ne pourra lui permettre de voler qu'un certain temps. En fonction du scénario proposé, la durée de déploiement d'un tel réseau peut aller de quelques heures, dans le cas d'une manifestation ou un événement sportif rassemblant un nombre important de personnes, à quelques jours ou semaines, dans le cas des catastrophes naturelles où le réseau a pour but d'offrir aux personnes sinistrées ou à la sécurité civile un accès à un réseau de communication, le remplacement du drone sera donc obligatoire et l'échelle de ce remplacement fera l'objet de la première section. Notre but n'est pas de garder un nœud en vol à l'infini, mais de s'intéresser à la consommation énergétique pour trouver des pistes d'amélioration de nos propositions pour limiter les remplacements en gardant une topologie du réseau la plus stable possible.

Avant de procéder au remplacement d'un drone, nous avons besoin d'un modèle énergétique. Ce modèle sera utile, d'un côté pour estimer l'énergie consommée par l'UAV pendant la mission et de l'autre pour anticiper les déchargements des batteries, nous permettant, par exemple, de guider le processus de remplacement.

Pour calculer la consommation d'énergie, nous avons pris en compte les principaux équipements embarqués sur un UAV, tels que les moteurs à hélice, le processeur

Paramètre	Valeur
Un moteur en vol stationnaire	3 A (mpère)
Un moteur en déplacement	5 A
Une antenne Wi-Fi en réception / en attente	300 mA
Une antenne Wi-Fi en transmission	400 mA
Le CPU à 50% d'utilisation	600 mA
La capacité de la batterie	6200 mAh

TABLEAU 5.1 Paramètres du modèle énergétique.

(*Central Processing Unit (CPU)*) et les antennes Wi-Fi. Un modèle précis de consommation d'un moteur dépend des conditions météorologiques (température, pression atmosphérique, vents), du diamètre et du pas¹ de l'hélice, de la résistance interne et de l'efficacité du moteur. Nous avons choisi d'utiliser les mesures présentées dans [121]. Les auteurs ont mené une étude approfondie sur la consommation énergétique dans divers états de mouvement discrets d'un drone.

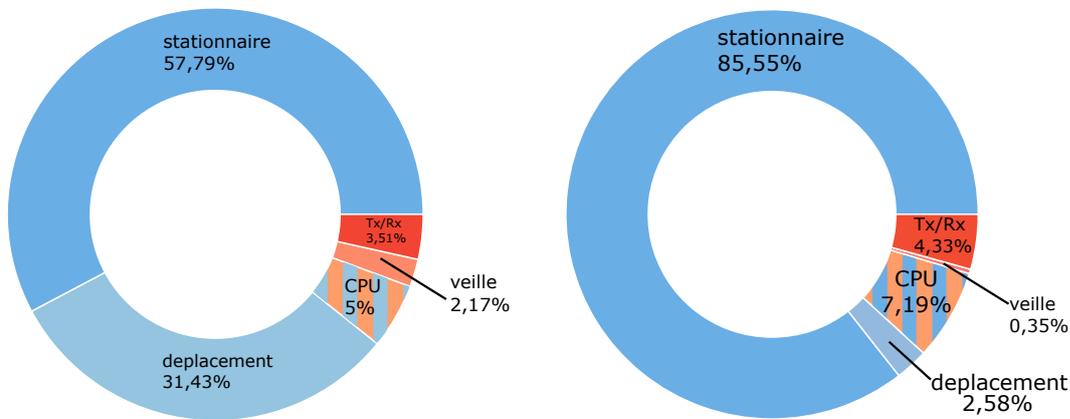
La consommation des antennes Wi-Fi est également basée sur d'autres expériences faites dans [122]. Dans cet article, les auteurs ont mesuré en détail la consommation d'énergie des nœuds sans fil. Le dernier équipement pris en compte dans notre modèle énergétique est le CPU. Nous avons imaginé que les UAVs embarqueraient un ordinateur de bord qui sera en charge de contrôler le drone pour exécuter les décisions prises par PID. Dans [123], les auteurs ont mesuré la consommation d'énergie d'un Raspberry Pi en fonction de l'utilisation du processeur. Un résumé de la consommation d'énergie différente utilisé dans notre simulation est donné dans le tableau 5.1.

Pour déterminer la durée de vie de la batterie, nous avons alors utilisé l'équation (5.1), où T_r est la durée de vie restante de la batterie en heures, C_b la capacité de la batterie en mAh, et C_e est le courant consommé par le drone. Un facteur ϵ a été rajouté pour prendre en compte les conditions externes pouvant affecter l'autonomie de la batterie. En ce qui concerne les calculs que nous avons effectués nous avons fixé $\epsilon = 0,7$ pour tenir compte des facteurs externes pouvant affecter la durée de vie de la batterie (température externe, âge de la batterie, nombre de cycles de chargement, etc.).

1. Le pas d'une hélice se traduit par le changement de l'angle d'attaque des pales dans ou hors du vent pour contrôler la production ou l'absorption de puissance.

$$T_r = C \frac{C_b}{C_e} \epsilon \quad (5.1)$$

Contrairement aux réseaux de capteurs où les contraintes énergétiques imposent une utilisation des nœuds très stricte pour gérer de manière efficace la durée de vie d'un capteur, nous savons déjà qu'un drone ne pourra pas rester en vol pendant la totalité de la durée d'exploitation du réseau sans que sa batterie ne soit rechargée. En revanche, nous souhaitons évaluer l'impact des manœuvres liées au vol et l'impact de la communication sur le déchargement de la batterie.



(a) Répartition des consommations pour $p = 0,35$, recherche utilisateurs. (b) Répartition des consommations pour $p = 0,75$.

FIGURE 5.1 Proportion de la consommation énergétique entre les mouvements dus au vol et la communication.

Nous avons choisi de commencer l'analyse de la consommation énergétique en regardant la répartition de l'utilisation de la batterie entre le vol et la communication. Les résultats illustrés sont issus d'une moyenne entre la consommation de 10 drones. Dans la figure 5.1 nous présentons en détail cette proportion. Ces résultats nous montrent que, dans le cas où $p = 0,75$, de la durée totale de vie de la batterie, 91,73% est utilisé par le maintien en vol du drone, 85,55% de la consommation est due au vol stationnaire tandis que le déplacement ne représente que 2,58%. Nous tenons à mentionner que la consommation du processeur a été répartie de manière égale entre le vol et la consommation car il sera utilisé par les deux fonctions. Du côté des communications, la consommation ne représente que 8,27% de la

durée totale de vie de la batterie. Plus précisément, sur ces 8,27%, la veille des antennes (aucun utilisateur connecté au drone) ne représente que 0,35%, tandis que l'émission et la réception des antennes consomme 4,33% de la durée de vie. Pour des soucis de simplification, nous n'avons pas inclus le nombre d'utilisateurs connectés dans le calcul de la consommation énergétique des antennes en transmissions, nous avons considéré que le drone a toujours quelque chose à recevoir ou à émettre. Quant à la consommation quand le mécanisme de recherche est actif, 5.1a, comme attendu, le déplacement initial des drones qui recherchent les utilisateurs augmente la consommation due au vol, 31,43% de la durée de vie de la batterie sera utilisé à ces fins.

De plus, le tableau 5.2 résume la consommation d'énergie d'un drone dans notre réseau. Sur la base du modèle décrit précédemment, nous avons comparé la durée de vie moyenne de la batterie et la consommation énergétique moyenne. Nous évaluons l'impact de la probabilité d'attractivité p et du nombre de canaux sur la consommation d'énergie. Pour déterminer la durée de vie moyenne de la batterie et un éventuel impact du nombre des canaux nous avons repris les cas de figure impliquant un nombre important d'utilisateurs et de drones. En analysant le résultat des simulations sur $N_U = 2000$ et $N_D = 40$ nous pouvons constater que le nombre de canaux n'a pas d'impact sur la durée de vie de la batterie, résultat visible dans la figure 5.2. Sur l'axe y bleu nous montrons sous forme de bâtons la durée moyenne en vol d'une batterie et sur l'axe y vert nous présentons sous forme de ligne la consommation moyenne en fonction du nombre de canaux. Ces deux moyennes ont été calculées sur l'ensemble de 40 drones et pour 50 essais par nombre de canaux. Bien sûr, nous supposons qu'un drone est en permanence en train de transmettre ou recevoir si au moins un utilisateur est connecté. En revanche, ce que ce résultat nous permet de conclure, c'est que le nombre de canaux n'a pas d'impact majeur sur la mobilité des drones et la consommation électrique qui en découle.

Cependant, comme nous l'avons vu, la position des utilisateurs a un effet considérable sur l'épuisement de la batterie. Pour $p = 1$, c'est-à-dire lorsque les utilisateurs sont tous regroupés autour de points d'intérêt, les UAVs n'ont pas à se déplacer de beaucoup, ce qui économise la durée de vie de la batterie, offrant environ 16 minutes de temps de vol. Comme justifié précédemment, des probabilités d'attractivité inférieures à 1 impliquent des utilisateurs plus dispersés dans la zone

Probabilité d'attractivité p	Durée de vie de la batterie	Consommation énergétique
$p = 1$	15, 22 minutes	17, 13 A
$p < 1$	10, 64 minutes	23, 97 A

TABLEAU 5.2 Moyennes sur la durée de vie de la batterie et sur la consommation énergétique.

donnée obligeant les drones à parcourir de plus longues distances pour les trouver, en utilisant plus de d'énergie. Lorsque $p < 1$, le drone consomme 30% d'énergie en plus, ce qui diminue la durée de vie moyenne, comme attendu.

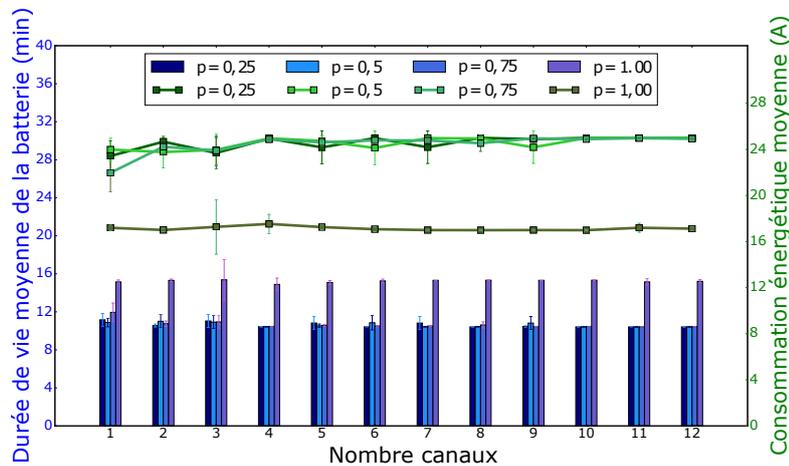


FIGURE 5.2 Durée de vie moyenne et consommation énergétique d'un drone.

Maintenir les drones en vol pour la durée de l'exploitation du réseau est clairement irréalisable dans un scénario général. Nous pouvons observer ainsi qu'une méthode de remplacement des drones est nécessaire. Il ne faut pas voir la substitution des UAVs comme un échec du réseau de communications que nous proposons, au contraire, le remplacement permettra l'utilisation de ce réseau sur une longue durée. En revanche, ce changement doit prendre en compte la topologie dynamique du réseau et doit avoir comme but de ne pas perturber le trafic qui circule dans le réseau. Dans la section suivante nous allons développer un mécanisme de remplacement automatique des drones dont la batterie est en fin de vie.

5.3 Remplacement d'un drone

Comme présenté dans l'analyse sur la consommation énergétique du réseau, chapitre 5.2, nous savons en avance qu'un nœud (un drone, dans notre réseau) devra être remplacé à un moment donné pour maintenir opérationnel le réseau. Dans cette section nous allons nous intéresser à une méthode permettant de maintenir la connectivité du réseau durant et après le remplacement d'un UAV qui doit être extrait du réseau. Notre objectif est de gérer la disparition d'un nœud sans perturber les flux de données circulant dans le réseau, ce qui signifie, en impactant le moins le protocole de routage. La proposition que nous faisons doit être la plus générale possible, afin d'être capable de s'adapter à tout protocole de routage.

Imaginons un réseau déjà déployé comportant plusieurs UAV tel que celui présenté dans la figure 5.3. Ce réseau est déjà déployé et couvre plusieurs utilisateurs au sol. Plusieurs types de flux de données sont véhiculés à travers le réseau, des données provenant des capteurs sont envoyées vers le centre de contrôle, illustré également sur la figure, des flux web provenant de la navigation Internet des utilisateurs, mais aussi des communications voix de type VoIP ou des images de surveillance transmises par les cameras installées sur les drones. Pour certains types de flux, une coupure temporaire de service n'est pas critique, les données provenant des capteurs peuvent par exemple être stockées sur les nœuds en attendant le rétablissement des liens, une approche DTN est alors envisageable. En revanche, pour les appels ou la surveillance vidéo, une interruption de service peut être plus gênante, car l'appel sera coupé et la diffusion vidéo sera interrompue. Nous envisageons que la méthode de remplacement proposée touche le moins possible le bon transfert des messages au sein du réseau.

Imaginons un appel de type VoIP se déroulant entre une source S et une destination D , comme illustré dans la figure 5.3. Nous avons choisi à titre d'exemple le problème sur l'appel VoIP car il demande une latence faible et une gigue s'approchant de zéro pour une qualité d'expérience optimale. La source et la destination sont connectées chacune à un UAV qui sont reliés à l'aide de trois drones relai, \mathbb{D}_1 , \mathbb{D}_2 , \mathbb{D}_3 . Pendant le déroulement de l'appel, le drone \mathbb{D}_3 informe le centre de contrôle via le plan de gestion du réseau que sa batterie est presque épuisée et qu'il convient donc de le remplacer. Un plan de gestion est important dans ce type de réseau, car il permet d'échanger des informations sur l'état de la batterie, les paramètres

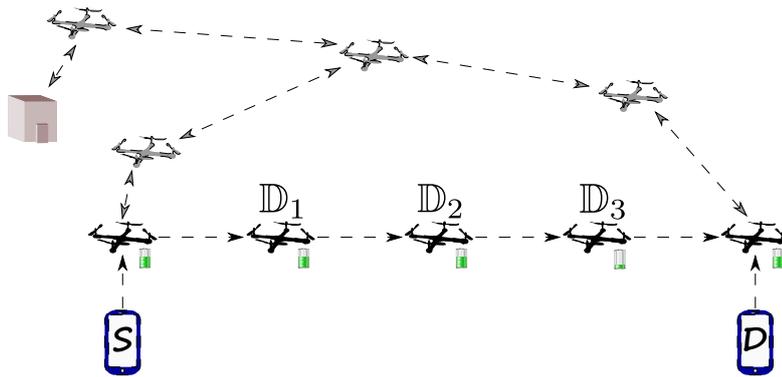


FIGURE 5.3 Scénario illustrant le remplacement d'un drone en fin de vie de la batterie.

utilisés des liens radio mais aussi sur la position des utilisateurs, permettant à un opérateur d'effectuer une cartographie des personnes au sol. Nous allons profiter du fait que l'UAV est capable de prévenir le centre de contrôle de l'état de sa batterie pour envoyer un drone de remplacement avant que le niveau d'énergie ne devienne critique facilitant le remplacement. Pour effectuer ce remplacement, le modèle de placement proposé dans le chapitre 3 montre de nouveau son utilité car le nouveau drone \mathbb{D}_4 va faire jouer son effet de répulsion sur \mathbb{D}_3 qui se déplacera pour faire place au nouveau UAV comme présenté dans la figure 5.4.

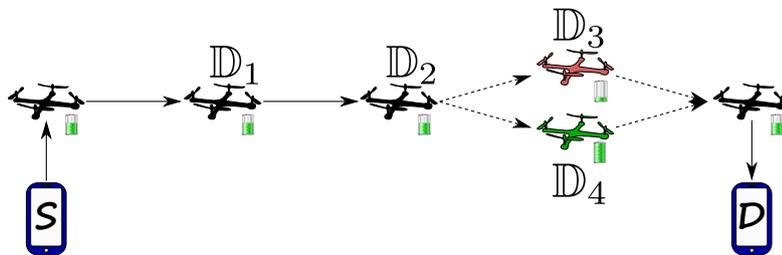


FIGURE 5.4 L'intégration du drone de remplacement dans le réseau ad hoc.

Intuitivement, nous pouvons penser qu'une solution pour contourner le remplacement du drone partant peut être de dévier les flux de données par un autre chemin de la source à la destination. Effectivement, cette solution permettrait d'éviter l'anticipation du remplacement, mais le déploiement spontané et aléatoire du réseau induit par le modèle de placement fait qu'aucune garantie sur un deuxième chemin entre la source et la destination n'est donnée. Ainsi, notre solution simple de

remplacement nous paraît plus adaptée, n'étant pas tributaire d'une configuration particulière du réseau.

Notre modèle fondé sur les forces virtuelles est tout à fait capable de gérer le remplacement d'un drone. L'UAV arrivant va prendre sa place dans le réseau en "poussant" celui qui doit être remplacé. En revanche, un algorithme de routage qui n'est pas adapté à ce type de changement de topologie pourra ne pas réagir suffisamment rapidement et donc provoquer une coupure dans la topologie. Dans la partie suivante, nous allons présenter l'amélioration que nous avons faite sur le routage, qui va profiter du fait que le remplacement peut être anticipé, de sorte à éviter une éventuelle coupure de routage.

5.4 Adaptation du routage

5.4.1 Analyse du remplacement sur le routage

Observons maintenant l'impact du remplacement proposé précédemment sur l'algorithme de routage. Comme indiqué dans le chapitre 2.4 nous avons choisi OLSR comme algorithme de routage au sein de notre réseau. Nous avons implanté le scénario proposé auparavant sous `ns-3` pour observer le comportement de OLSR dans le cas où un nœud du réseau disparaît, étant remplacé par un nouveau. Dans la figure 5.5, une chute de débit est visible sur la communication entre la source et la destination (la courbe rouge) due au temps nécessaire pour que le protocole s'adapte à la nouvelle topologie. Notre objectif n'est pas de proposer un nouveau protocole de routage, mais d'examiner et minimiser l'impact du remplacement sur un algorithme de routage spécifique aux réseaux MANET, comme OLSR. Des algorithmes de routage fondés sur l'énergie existent déjà, section 2.4, ils sont tout à fait adaptés à minimiser la consommation énergétique dans le réseau. Notre objectif est de voir comment le protocole de routage, quel qu'il soit, peut être adapté pour profiter de la connaissance en avance du remplacement de sorte à l'anticiper en modifiant les routes avant la disparition du nœud remplacé.

Pour mieux comprendre le comportement de OLSR dans ce type de situation, il convient qu'une brève description du fonctionnement du protocole soit faite. OLSR a été conçu pour fonctionner de manière totalement distribuée et donc de ne pas dépendre d'aucune entité centrale. La découverte des nœuds dans le réseau est

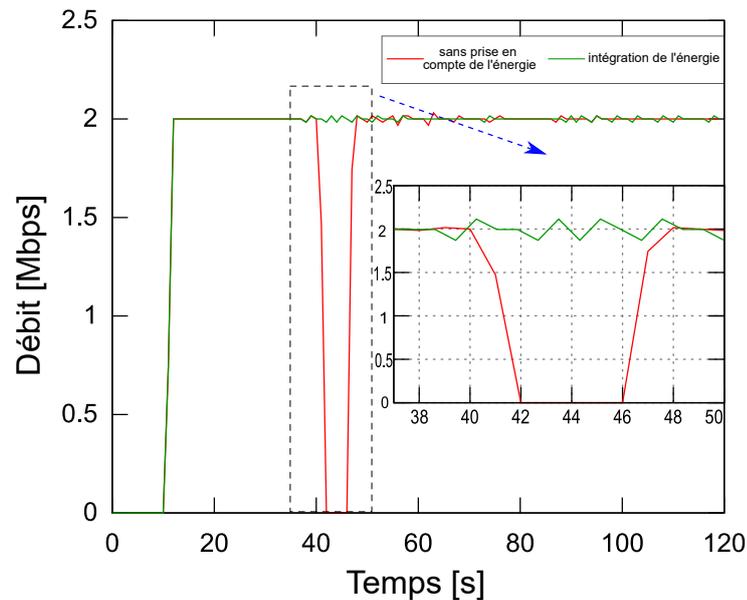


FIGURE 5.5 Impact du remplacement d'un drone sur l'algorithme de routage dans le cas d'un appel VoIP en cours.

faite grâce aux messages **HELLO**, envoyés généralement toutes les 2 secondes, qui sont propagés aux voisins directs et contenant une liste des voisins du nœud qui envoie le message. Cela permet à chaque nœud de découvrir le voisinage à deux sauts. À l'aide de ces informations l'élection d'un *MultiPoint Relay* (MPR) est faite. Un nœud pour qu'il soit élu doit avoir un lien vers chaque voisin à deux sauts, en d'autres termes, le nœud élu doit pouvoir atteindre un nombre plus grand de nœuds à deux sauts que ses voisins. Le but de cette élection est de réduire le nombre de retransmissions des doublons lors du transfert d'un paquet de diffusion et de restreindre l'ensemble des nœuds retransmettant un paquet (inondation régulière) à un sous-ensemble de tous les nœuds. Les MPRs sont importants dans le contexte OLSR car ils vont engendrer et transmettre les messages *Topology Control* (TC), envoyés généralement toutes les 10 secondes. Seuls les MPRs sont déclarés dans les messages TC qui contiennent l'état des liens, cela minimisant la taille des messages. Chaque message TC contient tout le voisinage du MPR qui l'a généré. Ainsi, si un nœud k reçoit un TC d'un MPR x quelque part dans le réseau, k connaît alors la topologie du voisinage de x et de plus, k reçoit le TC sur le plus court chemin de x à k puisqu'il a été transféré depuis d'autres nœuds MPR. En conséquence, k reçoit

toutes les informations nécessaires pour calculer le chemin le plus court vers le voisinage d'un autre MPR.

Cette chute, évoquée préalablement, provient du fonctionnement de l'algorithme de routage au moment de la découverte d'un nouveau nœud dans le réseau. Initialement, à $t = 20$ secondes, le drone \mathbb{D}_4 arrive sur la position de \mathbb{D}_3 pour le remplacer suite à sa demande. Le comportement de OLSR est que, à l'arrivée du \mathbb{D}_4 , celui-ci envoie des messages HELLO pour annoncer sa présence ainsi que ses voisins. Puisque celui-ci n'introduit pas de nouveaux voisins dans le réseau, son seul voisin étant en commun avec \mathbb{D}_3 , aucun message TC n'est diffusé car le MPR n'a pas de raison pour annoncer une nouvelle route vers la destination, une route existant déjà en passant par \mathbb{D}_3 . Ainsi, lors du départ du drone en fin de vie la route vers la destination est coupée le temps de rerouter le trafic à travers \mathbb{D}_4 . La réaction que nous espérons déclencher dans OLSR serait de router le trafic via le nouveau nœud permettant ainsi à l'UAV ayant la batterie déchargée de quitter sa position.

Pour aider les protocoles de routage à préparer le remplacement, la solution que nous avons adoptée en conjonction avec le mécanisme de remplacement est de fournir la quantité d'énergie restante comme paramètre d'entrée de l'algorithme, ainsi lui permettant de privilégier une nouvelle route vers la destination. Nous considérons que cette solution a l'avantage d'être simple grâce à sa généricité, pouvant s'adapter en fonction du protocole de routage utilisé. Dans le cas de son adaptation à OLSR, l'algorithme que nous avons choisi pour notre réseau, chaque nœud comprend un attribut diffusé dans les messages, la *willingness*, la volonté d'un nœud à relayer les messages de ses voisins et donc de router du trafic. Sa valeur varie entre 0 et 7 et influe sur la sélection des routes par les MPRs. Le nœud avec la plus grande volonté sera utilisé en priorité comme route vers ses voisins et il aura une priorité plus grande au moment de la sélection des MPRs s'il est candidat. Nous avons décidé de lier ce paramètre à la charge restante de la batterie de chaque drone, adaptant ainsi dynamiquement la volonté, 7 pour une batterie presque pleine et 1 pour de très faibles niveaux de charge.

Par conséquent, après cette intégration du mécanisme de remplacement à l'algorithme de routage, nous observons qu'il n'y a plus de coupure dans le trafic entre la source et la destination, courbe verte dans la figure 5.5. En effet, à l'apparition du nœud \mathbb{D}_4 ayant une volonté plus grande que \mathbb{D}_3 il forcera le MPR d'envoyer un message TC changeant ainsi la route vers la destination, la nouvelle

passant par \mathbb{D}_4 . Ainsi, au moment du départ de \mathbb{D}_3 , les tables de routage sont déjà mises à jour avec la nouvelle route.

5.5 Synthèse

Dans un premier temps nous avons analysé la consommation électrique d'un drone dans le réseau. Ensuite, nous avons proposé un mécanisme de remplacement automatique des drones en fin de vie de batterie. Ce mécanisme profite du plan de contrôle pour demander à un centre de gestion son remplacement. Le remplacement effectif est réalisé en utilisant le principe des forces de répulsion sur lequel notre mécanisme de placement est fondé. Dans un deuxième temps, nous avons montré que, dans notre scénario spécifique, le routage était sensible au remplacement de nœud, une perte de connectivité entre les nœuds étant constatée. Pour adapter le protocole de routage à nos circonstances, nous avons proposé une solution simple et générique consistant en une intégration du mécanisme de remplacement de la batterie, connaissant la charge de la batterie de nos drones dans le protocole de routage, par le biais de la volonté d'un nœud à router du trafic, dans le cas d'OLSR. Le maintien d'une connexion permanente pendant le remplacement d'un drone étant ainsi assuré.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions

Aussi surprenant que cela puisse paraître, les réseaux terrestres peuvent avoir des difficultés à offrir un service acceptable lors des événements regroupant un nombre conséquent de personnes, à cause du manque potentiel de ressources au niveau des cellules couvrant la zone de l'événement. De plus, lors des catastrophes naturelles, l'infrastructure terrestre peut connaître des défaillances suite à la destruction totale ou partielle des équipements.

En même temps, l'utilisation des drones connaît une expansion impressionnante à partir des années 2010, les avancées technologiques leur permettant une apparition sur le marché commercial et grand public. La capacité à embarquer des équipements ainsi que leur manœuvrabilité et agilité en vol font des UAVs un complément judicieux aux réseaux de communication terrestres pour desservir des zones densément peuplées ou en cas d'infrastructure pré-existante défaillante.

Dans cette thèse nous avons envisagé les drones comme des points d'accès sans fil constituant un réseau de communication ad hoc et nous avons proposé un mécanisme d'auto-déploiement distribué de ce réseau, que nous avons appelé PID. Dans ce cadre, plusieurs aspects ont dû être pris en compte pour le bon fonctionnement du réseau. D'abord, pour que la solution proposée soit la plus générique possible, nous avons considéré que PID doit fonctionner indépendamment des positions exactes des potentiels utilisateurs. La méthode de découverte des

utilisateurs et le placement des drones doivent fonctionner de manière autonome et s'adapter dynamiquement à la mobilité des utilisateurs. En fonction des scénarios d'utilisation, la durée de fonctionnement du réseau peut être conséquente et les drones ayant une source d'énergie limitée, le réseau doit prendre en compte le changement topologique dû à la réorganisation ou au remplacement des drones, sans perturbation du service offert aux utilisateurs.

Les contributions présentées dans ce manuscrit sont :

1. Sans connaissance exacte des positions des utilisateurs, le modèle de placement des drones est construit sur le principe des forces virtuelles, une analogie à la loi de Coulomb. Dans ce modèle, les drones et les utilisateurs sont considérés comme des charges électriques de signe opposé, les forces d'attraction et de répulsion permettant à la fois de se rapprocher des utilisateurs et garder une distance minimale entre les drones pour éviter les collisions et les interférences radio. Les messages de gestion de la technologie sans fil utilisée, comme le Wi-Fi, sont interprétés par PID au niveau de chaque drone comme des interactions entre les UAVs et les utilisateurs qui commandent ensuite le prochain mouvement du drone. En cas de mobilité des utilisateurs, chaque drone est capable de réagir de manière autonome et distribuée au changement, grâce à ce modèle.
2. Nous considérons qu'avoir des informations précises sur la position des utilisateurs n'est pas envisageable. Même si la position de chaque utilisateur ne peut pas être connue, nous pouvons disposer de certaines informations qui pourront aider à déterminer les zones où la probabilité de trouver des utilisateurs est élevée. Nous introduisons ainsi la notion de point d'intérêt. Les utilisateurs sont censés être proches des points d'intérêt. La position d'un utilisateur particulier n'est pas connue, mais la position bien connue du POI fournit des informations statistiques sur les positions des utilisateurs qui facilitent ainsi le déploiement des drones.
3. La résilience du réseau est assurée grâce à la méthode de remplacement des drones (en cas d'épuisement de la batterie, par exemple). En utilisant les informations sur l'état de la batterie d'un drone, celui-ci est capable d'anticiper son remplacement. Un autre UAV arrivera pour effectuer le remplacement, les autres se replaçant automatiquement suite aux interactions

entre les forces virtuelles. En profitant des informations fournies par le modèle d'énergie le protocole de routage s'adapte pour acheminer le trafic à travers le nouveau drone, celui en fin de vie de batterie pouvant être libéré une fois la reconfiguration faite.

Perspectives

Nos travaux montrent que l'utilisation des drones en tant que points d'accès d'un réseau ad hoc pour la couverture temporaire des utilisateurs est réalisable.

Dans une prochaine étape, il serait intéressant d'analyser l'impact de la différenciation des utilisateurs sur le déploiement. En effet, dans nos études, les utilisateurs possèdent la même priorité de couverture. En fonction des scénarios, certains utilisateurs peuvent avoir un rôle plus important, comme par exemple la sécurité civile en cas de catastrophe naturelle, ou les organisateurs des événements. Dans ce cas, une qualité de service différente peut être accordée à ces utilisateurs et les drones doivent se positionner en concordance avec ces demandes. Un modèle de trafic, plus proche de la réalité du terrain, pourra être ainsi envisagé pour analyser cet impact.

De plus, comme nous avons remarqué, la décision de suivre les utilisateurs peut ne pas être la meilleure dans tous les circonstances. En fonction des caractéristiques de l'événement couvert, public fortement mobile, ou public généralement statique, il serait judicieux de lier la décision de suivre les utilisateurs au type de scénario couvert. Un point scientifique, intéressant à étudier, pourra être l'approximation de la probabilité d'attractivité p . En effet, des modèles (expérimentaux ou mathématiques) pourront être envisagés pour déduire cette valeur qui facilitera par la suite le fonctionnement de PID.

La gestion des ressources est un autre problème de recherche méritant d'être abordé par la suite. En particulier, il est nécessaire de disposer d'un cadre permettant de gérer de façon dynamique diverses ressources, notamment la bande passante, l'énergie, la puissance d'émission, le temps de vol et le nombre d'UAVs. Par exemple, comment ajuster de manière dynamique la puissance d'émission et la trajectoire d'un drone desservant les utilisateurs au sol? Dans ce cas, une piste sera de fournir des mécanismes d'allocation de bande passante capables de s'adapter aux emplacements des drones voisins, de leur mobilité, des interférences, des services demandés ou de l'énergie des UAVs. Un autre aspect intéressant est lié à l'orientation des drones. Pour

assurer une connectivité permanente (ou quasi-permanente) entre les UAVs, une attention particulière doit être portée à l'alignement des antennes qui permettent la communication entre les drones. Ainsi, un mécanisme d'auto-orientation pourra être étudié et intégré dans notre modèle de placement.

Notre méthode de placement est fondée sur une approche décentralisée car nous avons considéré que la connectivité entre les UAVs peut être intermittente. Ainsi, les UAVs doivent être capables de prendre des décisions de placement de manière autonome. Dans un second temps, il serait judicieux d'étudier une approche hybride de placement, combinant des méthodes centralisées et décentralisées. Ainsi, une entité centrale pourra être intégrée dans le système, et utilisera les informations sur les positions des utilisateurs découverts (drones spécialisés, estimation de p , etc.) pour effectuer à des intervalles réguliers une optimisation globale du placement. PID, qui fonctionne de manière autonome sur chaque drone, pourra ainsi adapter son placement pour augmenter la couverture.

À long terme, il serait intéressant d'effectuer une preuve de concept de ce réseau. Les résultats théoriques montrent qu'une telle application des drones n'est pas sans intérêt. Le comportement du modèle devra être étudié à travers des expérimentations afin d'identifier des potentielles lacunes et les corriger, surtout sur les principaux éléments constitutifs. Plus particulièrement, des tests pourront être effectués sur les techniques de réduction des interférences, primordial pour les scénarios de déploiement massif de drones. De plus, les mécanismes de transfert dynamique d'utilisateurs représentent une autre composante clé à valider en cas de mobilité des utilisateurs ou suite à des remplacements des UAVs. Un grand nombre de personnes pourront bénéficier de ces services dans diverses situations, faisant de cette proposition une potentielle solution commerciale.

PUBLICATIONS

Conférence internationale avec comité de relecture

[124] : RAUTU, D., DHAOU, R., AND CHAPUT, E. Initial placement optimization for multi-channel UAV networks. In *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless (ADHOC-NOW)* (2019), Springer

[125] : RAUTU, D., DHAOU, R., AND CHAPUT, E. Crowd-based positioning of UAVs as Access Points. In *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)* (2018), IEEE

[126] : RAUTU, D., DHAOU, R., AND CHAPUT, E. Maintaining a permanent connectivity between nodes of an air-to-ground communication network. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)* (2017), IEEE, pp. 681–686

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Arrêté du 11 avril 2012 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord, *DEVA1207595A*. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2012/4/11/DEVA1207595A/jo/texte>, dernier accès au 01/05/2019.
- [2] FINN, R. L., AND WRIGHT, D. Unmanned aircraft systems : Surveillance, ethics and privacy in civil applications. *Computer Law & Security Review* 28, 2 (2012), pp. 184–194.
- [3] POLO, J., HORNERO, G., DUIJNEVELD, C., GARCÍA, A., AND CASAS, O. Design of a low-cost Wireless Sensor Network with UAV mobile node for agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 119 (2015), pp. 19–32.
- [4] BEKHTI, M., GARRAFFA, M., ACHIR, N., BOUSSETTA, K., AND LÉTOCART, L. Assessment of multi-UAVs tracking for data gathering. In *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)* (2017), IEEE, pp. 1004–1009.
- [5] PANG, Y., ZHANG, Y., GU, Y., PAN, M., HAN, Z., AND LI, P. Efficient data collection for wireless rechargeable sensor clusters in harsh terrains using UAVs. In *Global Communications Conference (GLOBECOM)* (2014), IEEE, pp. 234–239.
- [6] ASADPOUR, M., VAN DEN BERGH, B., GIUSTINIANO, D., HUMMEL, K. A., POLLIN, S., AND PLATTNER, B. Micro aerial vehicle networks : An experimental analysis of challenges and opportunities. *IEEE Communications Magazine* 52, 7 (2014), pp. 141–149.
- [7] JONSON, T., PEZESHKI, J., CHAO, V., SMITH, K., AND FAZIO, J. Application of delay tolerant networking (DTN) in airborne networks. *IEEE Military Communications Conference* (2008), pp. 1–7.
- [8] ZENG, Y., ZHANG, R., AND LIM, T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles : opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine* 54, 5 (2016), pp. 36–42.
- [9] ORSINO, A., OMETOV, A., FODOR, G., MOLTCHANOV, D., MILITANO, L., ANDREEV, S., YILMAZ, O. N., TIRRONEN, T., TORSNER, J., ARANITI, G., AND OTHERS. Effects of heterogeneous mobility on D2D-and drone-assisted

- mission-critical MTC in 5G. *IEEE Communications Magazine* 55, 2 (2017), pp. 79–87.
- [10] SCHERER, J., YAHYANEJAD, S., HAYAT, S., YANMAZ, E., ANDRE, T., KHAN, A., VUKADINOVIC, V., BETTSTETTER, C., HELLWAGNER, H., AND RINNER, B. An autonomous multi-UAV system for search and rescue. In *Proceedings of the First Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use* (2015), ACM.
- [11] QUARITSCH, M., KRUGGL, K., WISCHOUNIG-STRUCL, D., BHATTACHARYA, S., SHAH, M., AND RINNER, B. Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 127, 3 (2010), pp. 56–63.
- [12] O'REILLY, G., JRAD, A., NAGARAJAN, R., BROWN, T., AND CONRAD, S. Critical infrastructure analysis of telecom for natural disasters. In *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, 2006. NETWORKS 2006. 12th International* (2006), IEEE, pp. 1–6.
- [13] GOLDSMITH, A. *Wireless communications / Andrea Goldsmith,..* Cambridge University Press, Cambridge New York, 2005.
- [14] ERICSSON. *Cell Planning Principles*. Student Text EN/LZT 1233314 R3A. 1997.
- [15] ANDERSON, H. R., AND MCGEEHAN, J. P. Optimizing microcell base station locations using simulated annealing techniques. In *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)* (June 1994), pp. 858–862 vol.2.
- [16] MOLINA, A., NIX, A. R., AND ATHANASIADOU, G. E. Optimised base-station location algorithm for next generation microcellular networks. *Electronics Letters* 36, 7 (Mar. 2000), pp. 668–669.
- [17] WHITAKER, R. M., AND HURLEY, S. Omni-directional cell planning. In *Telecommunications Network Design and Management*, Operations Research/Computer Science Interfaces Series. Springer US, Boston, MA, 2003, pp. 25–46.
- [18] AMALDI, E., BELOTTI, P., CAPONE, A., AND MALUCELLI, F. Optimizing base station location and configuration in UMTS networks. *Ann Oper Res* 146, 1 (Sept. 2006), pp. 135–151.
- [19] GALOTA, M., GLASSER, C., REITH, S., AND VOLLMER, H. A polynomial-time approximation scheme for base station positioning in UMTS networks. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications* (New York, NY, USA, 2001), ACM, pp. 52–59.
- [20] AMALDI, E., CAPONE, A., MALUCELLI, F., AND SIGNORI, F. UMTS radio planning : optimizing base station configuration. In *Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference* (Sept. 2002), vol. 2, pp. 768–772 vol.2.

- [21] AMALDI, E., CAPONE, A., AND MALUCELLI, F. Planning UMTS base station location : optimization models with power control and algorithms. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 2, 5 (Sept. 2003), pp. 939–952.
- [22] MATHAR, R., AND SCHMEINK, M. Integrated optimal cell site selection and frequency allocation for cellular radio networks. *Telecommunication Systems* 21, 2 (Dec. 2002), pp. 339–347.
- [23] LAIHO, J. Radio network planning and optimisation for WCDMA. *Helsinki University of Technology* (July 2002).
- [24] WHITAKER, R. M., RAISANEN, L., AND HURLEY, S. A model for conflict resolution between coverage and cost in cellular wireless networks. In *37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2004. Proceedings of the* (Jan. 2004), pp. 8 pp.–.
- [25] CALEGARI, P., GUIDEC, F., KUONEN, P., AND WAGNER, D. Genetic approach to radio network optimization for mobile systems. In *Technology in Motion 1997 IEEE 47th Vehicular Technology Conference* (May 1997), vol. 2, pp. 755–759 vol.2.
- [26] SHERALI, H. D., PENDYALA, C. M., AND RAPPAPORT, T. S. Optimal location of transmitters for micro-cellular radio communication system design. *IEEE Journal on selected areas in communications* 14 (1996), pp. 662–673.
- [27] LEE, C. Y., AND KANG, H. G. Cell planning with capacity expansion in mobile communications : a tabu search approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 49, 5 (Sept. 2000), pp. 1678–1691.
- [28] HUANG, X., BEHR, U., AND WIESBECK, W. Automatic cell planning for a low-cost and spectrum efficient wireless network. In *Globecom '00 - IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No.00CH37137)* (Nov. 2000), vol. 1, pp. 276–282 vol.1.
- [29] HAN, J. K., PARK, B. S., CHOI, Y. S., AND PARK, H. K. Genetic approach with a new representation for base station placement in mobile communications. In *IEEE 54th Vehicular Technology Conference. VTC Fall 2001. Proceedings (Cat. No.01CH37211)* (Oct. 2001), vol. 4, pp. 2703–2707 vol.4.
- [30] LIU, J., KOU, T., CHEN, Q., AND SHERALI, H. D. Femtocell base station deployment in commercial buildings : A global optimization approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 30, 3 (Apr. 2012), pp. 652–663.
- [31] BAHÇECİ, S. On femto-cell deployment strategies for randomly distributed hotspots in cellular networks. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE* (2014), IEEE, pp. 2330–2335.
- [32] CHOU, S.-F., CHIU, T.-C., YU, Y.-J., AND PANG, A.-C. Mobile small cell deployment for next generation cellular networks. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE* (2014), IEEE, pp. 4852–4857.

- [33] CHEN, C. S., NGUYEN, V. M., AND THOMAS, L. On small cell network deployment : A comparative study of random and grid topologies. In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE* (2012), IEEE, pp. 1–5.
- [34] QUTQUT, M. H., ABOU-ZEID, H., HASSANEIN, H. S., RASHWAN, A. M., AND AL-TURJMAN, F. M. Dynamic small cell placement strategies for LTE heterogeneous networks. In *Computers and Communication (ISCC), 2014 IEEE Symposium on* (2014), IEEE, pp. 1–6.
- [35] IEEE. IEEE 802.11-1997 - IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 1997.
- [36] CISCO. Wireless LAN Design Guide. pp. 42.
- [37] MATEUS, G. R., LOUREIRO, A. A., AND RODRIGUES, R. C. Optimal network design for Wireless Local Area Network. *Annals of Operations Research* 106, 1 (Sept. 2001), pp. 331–345.
- [38] LEE, Y., KIM, K., AND CHOI, Y. Optimization of AP placement and channel assignment in wireless LANs. In *27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, 2002. Proceedings. LCN 2002.* (Nov. 2002), pp. 831–836.
- [39] BAHRI, A., AND CHAMBERLAND, S. Designing WLAN with minimum bandwidth guarantees. In *Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, 2005.(WiMob'2005), IEEE International Conference on* (2005), vol. 2, IEEE, pp. 86–89.
- [40] KOUHBOR, S., UGON, J., KRUGER, A., AND RUBINOV, A. Optimal placement of access point in WLAN based on a new algorithm. In *International Conference on Mobile Business (ICMB'05)* (July 2005), pp. 592–598.
- [41] KOUHBOR, S., UGON, J., MAMMADOV, M., RUBINOV, A., AND KRUGER, A. Coverage in WLAN : optimization model and algorithm. *e first IEEE International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications* 5 (2006), pp. 6.
- [42] PROMMAK, C., KABARA, J., TIPPER, D., AND CHARNSRIPINYO, C. Next generation wireless LAN system design. In *MILCOM 2002. Proceedings* (Oct. 2002), vol. 1, pp. 473–477 vol.1.
- [43] PROMMAK, C., KABARA, J., AND TIPPER, D. Demand-based network planning for large scale Wireless Local Area Networks. *1st International Conference on Broadband Networks (BROADNETS'04)* (2004), pp. 10.
- [44] GIBNEY, A. M., AND KLEPAL, M. Tool for automatic design and optimisation of large scale WLAN. *Seventh IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communication Networks* (2005), pp. 6.
- [45] SO, A., AND LIANG, B. Enhancing WLAN capacity by strategic placement of tetherless relay points. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 6, 5 (May 2007), pp. 522–535.
- [46] HILLS, A. Large-scale wireless LAN design. *IEEE Communications Magazine* 39, 11 (Nov. 2001), pp. 98–107.

- [47] LING, X., AND YEUNG, K. L. Joint access point placement and channel assignment for 802.11 wireless LANs. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 5, 10 (Oct. 2006), pp. 2705–2711.
- [48] VANHATUPA, T., HANNIKAINEN, M., AND HAMALAINEN, T. D. Genetic algorithm to optimize node placement and configuration for WLAN planning. In *2007 4th International Symposium on Wireless Communication Systems* (Oct. 2007), pp. 612–616.
- [49] MAKSURIWONG, K., VARAVITHYA, V., AND CHAIYARATANA, N. Wireless LAN access point placement using a multi-objective genetic algorithm. In *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483)* (Oct. 2003), vol. 2, pp. 1944–1949 vol.2.
- [50] WANG, T., XING, G., LI, M., AND JIA, W. Efficient WiFi deployment algorithms based on realistic mobility characteristics. In *The 7th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2010)* (Nov. 2010), pp. 422–431.
- [51] KAMENETSKY, M., AND UNBEHAUN, M. Coverage planning for outdoor wireless LAN systems. In *2002 International Zurich Seminar on Broadband Communications Access - Transmission - Networking (Cat. No.02TH8599)* (Feb. 2002), pp. 49–49.
- [52] AMALDI, E., CAPONE, A., CESANA, M., AND MALUCELLI, F. Optimizing WLAN radio coverage. In *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No.04CH37577)* (June 2004), vol. 1, pp. 180–184 Vol.1.
- [53] AMALDI, E., CAPONE, A., CESANA, M., MALUCELLI, F., AND PALAZZO, F. WLAN coverage planning : optimization models and algorithms. In *2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. VTC 2004-Spring (IEEE Cat. No.04CH37514)* (May 2004), vol. 4, pp. 2219–2223 Vol.4.
- [54] WERTZ, P., SAUTER, M., LANDSTORFER, F. A., WOLFLE, G., AND HOPPE, R. Automatic optimization algorithms for the planning of Wireless Local Area Networks. In *IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004* (Sept. 2004), vol. 4, pp. 3010–3014 Vol. 4.
- [55] MULLIGAN, R., AND AMMARI, H. M. Coverage in Wireless Sensor Networks : A survey. *Network Protocols and Algorithms* 2 (2010), pp. 27–53.
- [56] FLETCHER, G., LI, X., NAYAK, A., AND STOJMENOVIC, I. Back-tracking based sensor deployment by a robot team. In *2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)* (2010), IEEE, pp. 1–9.
- [57] MOUGOU, K., MAHFOUDH, S., MINET, P., AND LAOUITI, A. Redeployment of randomly deployed wireless mobile sensor nodes. In *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)* (Sept. 2012), pp. 1–5.

- [58] BARTOLINI, N., CALAMONERI, T., FUSCO, E. G., MASSINI, A., AND SILVESTRI, S. Push & pull : autonomous deployment of mobile sensors for a complete coverage. *Wireless Networks* 16, 3 (2010), pp. 607–625.
- [59] KAR, K., AND BANERJEE, S. Node placement for connected coverage in sensor networks. In *WiOpt'03 : Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks* (2003), pp. 2–pages.
- [60] KIM, Y., KIM, C., YANG, D., OH, Y., AND HAN, Y. Regular sensor deployment patterns for p-coverage and q-connectivity in wireless sensor networks. In *The International Conference on Information Network 2012* (Feb. 2012), pp. 290–295.
- [61] YUN, Z., BAI, X., XUAN, D., LAI, T. H., AND JIA, W. Optimal deployment patterns for full coverage and k-connectivity ($k < 6$) Wireless Sensor Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)* 18, 3 (2010), pp. 934–947.
- [62] WANG, Y., ZHENG, J., AND MITTON, N. Delivery delay analysis for roadside unit deployment in vehicular ad hoc networks with intermittent connectivity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65, 10 (2015), pp. 8591–8602.
- [63] MATESKA, A., AND GAVRILOVSKA, L. WSN coverage connectivity improvement utilizing sensors mobility. In *17th European Wireless 2011 - Sustainable Wireless Technologies* (Apr. 2011), pp. 1–8.
- [64] PARK, P., MIN, S., AND HAN, Y. A grid-based self-deployment schemes in mobile sensor networks. In *2010 Proceedings of the 5th International Conference on Ubiquitous Information Technologies and Applications* (Dec. 2010), pp. 1–5.
- [65] XIAO, J., HAN, S., ZHANG, Y., AND XU, G. Hexagonal grid-based sensor deployment algorithm. In *2010 Chinese Control and Decision Conference* (May 2010), pp. 4342–4346.
- [66] LIU, Y., AND LIANG, W. Approximate coverage in wireless sensor networks. In *The IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary (LCN'05)* (Nov. 2005), pp. 68–75.
- [67] WANG, G., CAO, G., AND PORTA, T. F. L. Movement-assisted sensor deployment. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 5, 6 (June 2006), pp. 640–652.
- [68] BABAIE, S., AND PIRAHESH, S. S. Hole detection for increasing coverage in Wireless Sensor Network using triangular structure. *arXiv :1203.3772 [cs]* (Mar. 2012). arXiv : 1203.3772.
- [69] TAN, H., WANG, Y., HAO, X., HUA, Q.-S., AND LAU, F. C. M. Arbitrary Obstacles Constrained Full Coverage in Wireless Sensor Networks. In *Wireless Algorithms, Systems, and Applications* (2010), Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–10.
- [70] ZOU, Y., AND CHAKRABARTY, K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces. In *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)* (Mar. 2003), vol. 2, pp. 1293–1303 vol.2.

- [71] CHEN, J., LI, S., AND SUN, Y. Novel deployment schemes for mobile sensor networks. *Sensors* 7 (Nov. 2007), pp. 2907–2919.
- [72] TAZIBT, C. Y., ACHIR, N., MUHLETHALER, P., AND DJAMAH, T. UAV-based data gathering using an artificial potential fields approach. In *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* (2019), IEEE, pp. 1–5.
- [73] LI, J., ZHANG, B., CUI, L., AND CHAI, S. An extended virtual force-based approach to distributed self-deployment in mobile sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 8, 3 (Mar. 2012), pp. 417307.
- [74] MAHFOUDH, S., KHOUFI, I., MINET, P., AND LAOUITI, A. Relocation of mobile wireless sensors in the presence of obstacles. In *ICT 2013* (May 2013), pp. 1–5.
- [75] TAN, G., JARVIS, S. A., AND KERMARREC, A. Connectivity-guaranteed and obstacle-adaptive deployment schemes for mobile sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 8, 6 (June 2009), pp. 836–848.
- [76] XU, Q., AND WANG, Q. Coverage optimization deployment based on virtual force-directed in Wireless Sensor Networks. *TPCSIT vol. 27* (2012), pp. 7.
- [77] LI, X., GUO, D., YIN, H., AND WEI, G. Drone-assisted public safety wireless broadband network. In *Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2015 IEEE* (2015), IEEE, pp. 323–328.
- [78] MERWADAY, A., AND GUVENC, I. UAV assisted heterogeneous networks for public safety communications. In *Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)* (2015), IEEE, pp. 329–334.
- [79] JIANG, F., AND SWINDLEHURST, A. L. Dynamic UAV relay positioning for the ground-to-air uplink. In *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010 IEEE* (2010), IEEE, pp. 1766–1770.
- [80] MOZAFFARI, M., SAAD, W., BENNIS, M., AND DEBBAH, M. Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles. In *Communications (ICC), 2016 IEEE International Conference on* (2016), IEEE, pp. 1–6.
- [81] MOZAFFARI, M., SAAD, W., BENNIS, M., AND DEBBAH, M. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage. *IEEE Communications Letters* 20, 8 (2016), pp. 1647–1650.
- [82] CAILLOUET, C., GIROIRE, F., AND RAZAFINDRALAMBO, T. Optimization of mobile sensor coverage with UAVs. In *IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)* (2018), IEEE, pp. 622–627.
- [83] PERKINS, C. E., AND BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications* (New York, NY, USA, 1994), SIGCOMM '94, ACM, pp. 234–244.

- [84] CLAUSEN, T., AND JACQUET, P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626 (Experimental), October 2003.
- [85] JOHNSON, D. B., AND MALTZ, D. A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Mobile computing*. Springer, 1996, pp. 153–181.
- [86] PERKINS, C., BELDING-ROYER, E., AND DAS, S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. Tech. rep., 2003.
- [87] KO, Y.-B., AND VAIDYA, N. H. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. *Wireless networks* 6, 4 (2000), pp. 307–321.
- [88] BASAGNI, S., CHLAMTAC, I., SYROTIUK, V. R., AND WOODWARD, B. A. A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM). In *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking* (1998), ACM, pp. 76–84.
- [89] KARP, B., AND KUNG, H.-T. Gpsr : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking* (2000), ACM, pp. 243–254.
- [90] WITT, M., AND TURAU, V. Bgr : Blind geographic routing for sensor networks. In *Third International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, 2005*. (2005), IEEE, pp. 51–61.
- [91] MOHANOOR, A. B., RADHAKRISHNAN, S., AND SARANGAN, V. Online energy aware routing in wireless networks. *Ad Hoc Networks* 7, 5 (2009), pp. 918–931.
- [92] GUO, Z., MALAKOOTI, S., SHEIKH, S., AL-NAJJAR, C., LEHMAN, M., AND MALAKOOTI, B. Energy aware proactive optimized link state routing in mobile ad-hoc networks. *Applied Mathematical Modelling* 35, 10 (2011), pp. 4715–4729.
- [93] TARIQUE, M., AND TEPE, K. E. Minimum energy hierarchical dynamic source routing for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks* 7, 6 (2009), pp. 1125–1135.
- [94] KARAYIANNIS, N. B., AND NADELLA, S. Power-conserving routing of ad hoc mobile wireless networks based on entropy-constrained algorithms. *Ad Hoc Networks* 4, 1 (2006), pp. 24–35.
- [95] AVUDAINAYAGAM, A., FANG, Y., AND LOU, W. Dear : a device and energy aware routing protocol for mobile ad hoc networks. In *MILCOM 2002. Proceedings* (2002), vol. 1, IEEE, pp. 483–488.
- [96] LIANG, W., LIU, Y., AND GUO, X. On-line disjoint path routing for network capacity maximization in ad hoc networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005* (2005), vol. 4, IEEE, pp. 2026–2031.
- [97] ARMENIA, S., GALLUCCIO, L., LEONARDI, A., AND PALAZZO, S. Transmission of VoIP traffic in multihop ad hoc IEEE 802.11 b networks : experimental results. *First International Conference on Wireless Internet (WICON'05)* (2005), pp. 148–155.

- [98] KAUR, D., AND KUMAR, N. Comparative analysis of AODV, OLSR, TORA, DSR and DSDV routing protocols in mobile ad-hoc networks. *International Journal of Computer Network and Information Security* 5, 3 (2013), pp. 39.
- [99] FRIIS, H. T. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE* 34 (1946), pp. 254–256.
- [100] The network simulator — ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Accessed : 2019-02-01.
- [101] LUO, Q., WANG, J., WANG, X., AND WU, K. Aero-sim : An ns-2 based simulator for aeronautical ad hoc networks. *KSII Transactions on Internet & Information Systems* 9, 7 (2015).
- [102] The network simulator — ns-3. <http://www.nsnam.org>. Accessed : 2019-02-01.
- [103] BAIDYA, S., SHAIKH, Z., AND LEVORATO, M. Flynetsim : An open source synchronized UAV network simulator based on ns-3 and ardupilot. In *Proceedings of the 21st ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems* (2018), ACM, pp. 37–45.
- [104] Omnet++. <https://omnetpp.org/>. Accessed : 2019-02-01.
- [105] JAVAID, A. Y., SUN, W., AND ALAM, M. Uavsim : A simulation testbed for unmanned aerial vehicle network cyber security analysis. In *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE* (2013), IEEE, pp. 1432–1436.
- [106] Opnet. <https://www.riverbed.com/fr/products/steelcentral/opnet.html>. Accessed : 2019-02-01.
- [107] KUSHNER, H. J., AND WHITING, P. A. Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions. *IEEE transactions on wireless communications* 3, 4 (2004), pp. 1250–1259.
- [108] KELLY, F. P., MAULLOO, A. K., AND TAN, D. K. Rate control for communication networks : shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research society* 49, 3 (1998), pp. 237–252.
- [109] LI, L., PAL, M., AND YANG, Y. R. Proportional fairness in multi-rate wireless LANs. In *IEEE INFOCOM 2008-The 27th Conference on Computer Communications* (2008), IEEE, pp. 1004–1012.
- [110] WANG, X., AND KAR, K. Cross-layer rate control for end-to-end proportional fairness in wireless networks with random access. In *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing* (2005), ACM, pp. 157–168.
- [111] IBM. IBM ILOG CP Optimizer. <https://www.ibm.com/analytics/cplex-cp-optimizer>, dernier accès au 01/05/2019.
- [112] IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>, dernier accès au 01/05/2019.
- [113] J VITERBI, A. Cdma principles of spread spectrum communications. *Addison-Wesley, Reading, MA* (1995).

- [114] YIN, H., AND ALAMOUTI, S. OFDMA : A broadband wireless access technology. In *2006 IEEE sarnoff symposium* (2006), IEEE, pp. 1–4.
- [115] ZEHL, S., ZUBOW, A., AND WOLISZ, A. BigAP : a seamless handover scheme for high performance enterprise IEEE 802.11 networks. In *NOMS 2016-2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium* (2016), IEEE, pp. 1015–1016.
- [116] BROCH, J., MALTZ, D. A., JOHNSON, D. B., HU, Y.-C., AND JETCHEVA, J. G. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *MobiCom* (1998), vol. 98, pp. 85–97.
- [117] ALDOUS, D., AND FILL, J. Reversible Markov chains and random walks on graphs. *Berkeley* (1995).
- [118] BETTSTETTER, C. Smooth is better than sharp : a random mobility model for simulation of wireless networks. In *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems* (2001), ACM, pp. 19–27.
- [119] PIÓRKOWSKI, M., SARAFIJANOVIC-DJUKIC, N., AND GROSSGLAUSER, M. On clustering phenomenon in mobile partitioned networks. In *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models* (2008), ACM, pp. 1–8.
- [120] HONG, X., GERLA, M., PEI, G., AND CHIANG, C.-C. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems* (1999), vol. 53, Citeseer, pp. 60.
- [121] DIETRICH, T., KRUG, S., AND ZIMMERMANN, A. An empirical study on generic multicopter energy consumption profiles. In *2017 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)* (2017), IEEE, pp. 1–6.
- [122] ZHAO, Z., MAO, Y., SHI, G., DOU, Z., AND SHU, Y. Energy-efficient data gathering in high-voltage transmission line monitoring system. In *2011 Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks* (2011), IEEE, pp. 45–51.
- [123] KAUP, F., GOTTSCHLING, P., AND HAUSHEER, D. PowerPi : Measuring and modeling the power consumption of the Raspberry Pi. In *Local Computer Networks (LCN)* (2014), IEEE, pp. 236–243.
- [124] RAUTU, D., DHAOU, R., AND CHAPUT, E. Initial placement optimization for multi-channel UAV networks. In *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless (ADHOC-NOW)* (2019), Springer.
- [125] RAUTU, D., DHAOU, R., AND CHAPUT, E. Crowd-based positioning of UAVs as Access Points. In *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)* (2018), IEEE.
- [126] RAUTU, D., DHAOU, R., AND CHAPUT, E. Maintaining a permanent connectivity between nodes of an air-to-ground communication network. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)* (2017), IEEE, pp. 681–686.

Résumé

Dernièrement, l'utilisation des drones est en pleine expansion dans multiples domaines, par exemple récemment la livraison des colis ou des repas. Parallèlement, les stations de base mobiles sont incapables parfois de satisfaire les exigences des utilisateurs, surtout en cas d'événements imprévus, tels que les catastrophes, les rassemblements ou les rencontres sportives. Une solution prometteuse consiste à profiter de la disponibilité des drones pour pallier les déficiences des réseaux cellulaires en les aidant à satisfaire les demandes par l'extension de la couverture à l'aide des points d'accès installés à bord des drones. Bien que les drones offrent un déploiement rapide, le placement devient l'un des problèmes clés. Dans ce manuscrit nous nous intéressons à ce type de réseaux et au placement des drones en proposant une méthode de déploiement fondée sur une analogie avec la loi de Coulomb, les utilisateurs et les drones agissant comme des charges électriques, les drones étant attirés par les utilisateurs.

Mots clés : UAV, drones, placement, FANET, réseaux ad hoc

Abstract

Recently, the use of drones is booming in many areas, newly in parcel or meal shippement. Analogue to this deployment, the flexibility and resilience requirements of cellular networks are not always met by terrestrial base stations, mainly in the case of unforeseen events, such as natural disasters, gatherings or sports events. One promising solution is to benefit from the availability of drones in order to fulfill the temporary failures of cellular networks by helping them to meet the demands by extending the coverage using the access points installed onboard the UAVs. Although drones offer rapid deployment, the placement becomes one of the key issues. In this thesis we focus on this type of networks and in the drone placement by proposing a deployment method based on an analogy with Coulomb's law, the users and the drones acting like electric charges, the drones being attracted by users.

Keywords : UAV, drones, deployment, FANET, ad hoc network