



HAL
open science

Stratégies de mobilité optimisées pour la tolérance aux perturbations dans les réseaux sans fil

Laurent Reynaud

► **To cite this version:**

Laurent Reynaud. Stratégies de mobilité optimisées pour la tolérance aux perturbations dans les réseaux sans fil. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSE1060 . tel-01540925

HAL Id: tel-01540925

<https://theses.hal.science/tel-01540925>

Submitted on 16 Jun 2017

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.



N° d'ordre NNT : 2017LYSE1060

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

École Doctorale ED 512
InfoMaths

Spécialité de doctorat : Informatique

Soutenue publiquement le 30/03/2017, par :
Laurent Reynaud

**Stratégies de mobilité optimisées pour la
tolérance aux perturbations dans les
réseaux sans fil**

Devant le jury composé de :

Valois Fabrice, Professeur, INSA de Lyon / CITI,

Président

Chaumette Serge, Professeur, Université de Bordeaux / LaBRI,
Mitton Nathalie, Directrice de Recherche, Inria Lille-Nord Europe / FUN,
Conan Vania, Directeur de Recherche, Thales Communications & Security,
Minet Pascale, Chargée de Recherche HDR, Inria Rocquencourt / EVA,

Rapporteur
Rapporteuse
Examineur
Examinatrice

Guérin-Lassous Isabelle, Professeure, Université de Lyon / LIP,

Directrice de thèse

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD - LYON 1

Président de l'Université Président du Conseil Académique Vice-président du Conseil d'Administration Vice-président du Conseil Formation et Vie Universitaire Vice-président de la Commission Recherche Directrice Générale des Services	M. le Professeur Frédéric FLEURY M. le Professeur Hamda BEN HADID M. le Professeur Didier REVEL M. le Professeur Philippe CHEVALIER M. Fabrice VALLÉE Mme Dominique MARCHAND
---	---

COMPOSANTES SANTÉ

Faculté de Médecine Lyon Est – Claude Bernard Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud – Charles Mérieux Faculté d'Odontologie Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation Département de formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directeur : M. le Professeur G.RODE Directeur : Mme la Professeure C. BURILLON Directeur : M. le Professeur D. BOURGEOIS Directeur : Mme la Professeure C. VINCIGUERRA Directeur : M. X. PERROT Directeur : Mme la Professeure A-M. SCHOTT
--	---

COMPOSANTES ET DÉPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Faculté des Sciences et Technologies Département Biologie Département Chimie Biochimie Département GEP Département Informatique Département Mathématiques Département Mécanique Département Physique UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives Observatoire des Sciences de l'Univers de Lyon Polytech Lyon Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1 Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education Institut de Science Financière et d'Assurances	Directeur : M. F. DE MARCHI Directeur : M. le Professeur F. THEVENARD Directeur : Mme C. FELIX Directeur : M. Hassan HAMMOURI Directeur : M. le Professeur S. AKKOUCHE Directeur : M. le Professeur G. TOMANOV Directeur : M. le Professeur H. BEN HADID Directeur : M. le Professeur J-C PLENET Directeur : M. Y.VANPOULLE Directeur : M. B. GUIDERDONI Directeur : M. le Professeur E.PERRIN Directeur : M. G. PIGNAULT Directeur : M. le Professeur C. VITON Directeur : M. le Professeur A. MOUGNIOTTE Directeur : M. N. LEBOISNE
---	---

Remerciements

Il en est d'une thèse de doctorat comme de toute œuvre humaine coopérative : soumise à l'altérité, son issue dépend puissamment des rapports humains. En effet, quoi qu'un tel travail semble en apparence ne reposer que sur une démarche essentiellement solitaire et simplement jalonnée de critères objectifs, il s'avère que sa réalisation dépend aussi d'une complexe conjonction de bonnes volontés. Dans ce domaine, mon expérience est probablement celle vécue par des générations de doctorants, qui ont également découvert au fil de l'eau l'importance pour le succès de leur entreprise du facteur humain et donc des dimensions psychologiques et émotionnelles qui s'y rattachent, pour le meilleur et pour le pire. Et à ce titre, je me considère remarquablement fortuné de n'avoir eu qu'à en vivre le meilleur ! Dans l'environnement privilégié qui a été le mien pendant les années de préparation, de réalisation et d'achèvement de cette thèse, j'ai eu la chance de côtoyer de nombreuses personnes qui m'ont ouvert des voies, encouragé, facilité le quotidien tant professionnel que personnel, aidé parfois à me remettre constructivement en question et somme toute, permis de régulièrement progresser avec ô combien plus de facilité ! L'ensemble de ces personnes, que je vais citer ici nommément ou non, je souhaite dans ce chapitre leur exprimer ma profonde gratitude, non seulement pour toute l'aide qu'elles m'ont apportée, bien-sûr, mais également pour l'avoir fait simplement, avec rigueur, bienveillance, intérêt authentique et bonne humeur. À mes yeux, il ne pouvait avoir meilleur terreau pour y dégrossir et faire prospérer les idées exprimées le long de cette étude. Merci.

Pour commencer, je souhaite remercier Fabrice Valois, Professeur à l'INSA Lyon et Directeur du Centre d'Innovation en Télécommunications et Intégration de Services (CITI), pour avoir accepté de bien vouloir présider mon jury de soutenance, et dans les faits d'en avoir donné le tempo. Mes remerciements vont ensuite à Nathalie Mitton, Directrice de Recherche de l'équipe self-organizing Future Ubiquitous Network (FUN) à l'INRIA Lille-Nord Europe ainsi qu'à Serge Chaumette, Professeur à l'Université de Bordeaux et responsable de l'équipe Mobility, Ubiquity, Security (MUSE) du Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI), qui ont tous deux accepté d'être rapporteurs de mon travail. Leurs remarques éclairées m'ont en effet permis d'amender ce mémoire et ainsi d'améliorer sa qualité. Également, j'ai eu la chance de pouvoir échanger lors de manifestations scientifiques avec Pascale Minet, Chargée de Recherche HDR dans l'équipe EVA de l'INRIA Paris, qu'avec Vania Conan, Directeur de Recherche à Thales Communications & Security sur le sujet des forces virtuelles et de la mobilité contrôlée, et par la suite, tous deux ont diligemment accepté de participer à mon jury de soutenance. Merci à vous.

Ce chapitre serait bien-sûr très incomplet sans l'expression de ma grande reconnaissance pour le travail essentiel de supervision réalisé par ma Directrice de thèse, Isabelle Guérin-Lassous, Professeure à l'Université Lyon 1. Malgré la distance et les contraintes spécifiques à réaliser conjointement un tel travail et mes activités quotidiennes d'ingénieur au sein d'Orange, j'ai pu en permanence bénéficier sous le suivi attentif d'Isabelle, de précieux conseils tant sur l'orientation générale des grandes idées directrices, que de tous les autres aspects de la thèse, même en apparence mineurs. Isabelle, j'ai immensé-

ment apprécié cet environnement que tu as bâti et entretenu, fait de rigueur, de bonne humeur, de souci de garder une approche objective et de favoriser autonomie et capacité de proposition. Merci à toi.

En outre, je tiens à exprimer ma gratitude envers l'ensemble des personnels du laboratoire Laboratoire de l'Informatique du Parallélisme (LIP) de Lyon, de l'Université de Lyon 1 et de l'École Doctorale InfoMaths, avec qui j'ai interagi tout au long du déroulement de cette thèse afin d'en valider les divers jalons techniques et administratifs. Ensuite, je souhaite naturellement saluer mon entreprise, Orange, qui m'a matériellement permis de réaliser dans de bonnes conditions cette thèse conjointement avec mon activité régulière d'ingénieur de Recherche et Développement. De nombreuses personnes, en particulier dans la division Innovation, Marketing et Technologies (IMT) du Groupe, à Orange Labs Networks (OLN) et Orange Labs Research (OLR), se sont assurées du succès de cette activité et je leur exprime ma reconnaissance. Parmi celles-ci, je souhaite remercier en particulier Antoine Delafoy de l'équipe Monitoring & Architecture for Country Support (MAX) au sein du département OLN/WNI/IPN pour sa prise en compte des contraintes spécifiques à une telle entreprise, ainsi que Valérie Pla et Yvon Gourhant, du Domaine de Recherche Digital Emerging Countries (DEC), au sein duquel étaient rattachées les thématiques abordées par ma thèse de doctorat. Merci également à Prosper Chemouil, Chargé de mission Réseaux du futur à OLN, dont la profonde connaissance des environnements scientifiques et universitaires m'a été extrêmement utile, en particulier lors de l'étape de préparation de cette thèse. Merci à toutes et à tous.

Enfin, dans un registre plus personnel, je remercie vivement ma compagne Nathalie, mes enfants Mathis, Gabriel, Maud et Astrid, ainsi que mes parents Catherine et Michel, dont le support et la présence m'ont permis de traverser cette dense période sans encombres. Merci pour votre affection, votre compréhension et vos encouragements.

Résumé

L'objectif de cette thèse est de proposer des stratégies d'optimisation protocolaire et architecturale adaptées aux cas d'usages pour lesquels les communications entre les nœuds d'un réseau sont susceptibles d'être fortement perturbées par des conditions de déploiement défavorables, sans que les mécanismes standards de réparation de panne prévus pour ce réseau puissent convenablement traiter et résorber les effets de ces perturbations. Il peut s'agir de divers contextes applicatifs, comme celui des réseaux de communication d'urgence, mis en œuvre suite à la survenue de désastres ou plus généralement d'incidents non planifiés capables de laisser les réseaux d'une zone affectée partiellement ou totalement endommagés. Les perturbations mentionnées peuvent être de différente nature : elles peuvent par exemple être provoquées par un dimensionnement du réseau défavorable (ex. nombre de nœuds trop faible, surface de dispersion des nœuds trop importante, portée des interfaces de communication sans fil trop réduites, ... en regard des autres paramètres de déploiement considérés). Elles peuvent aussi être provoquées par des causes externes, comme par exemple la présence non anticipée d'obstacles ou la survenue de sources d'interférences extérieures au réseau considéré. De manière générale, on constate qu'en présence de telles perturbations, un réseau non conçu pour spécifiquement fonctionner dans de telles conditions peut voir ses performances et la qualité d'expérience de ses utilisateurs baisser significativement.

Dans ce contexte, nous cherchons à comparer la perception que nous avons traditionnellement de la mobilité dans les réseaux sans fil, en particulier dans les réseaux ad hoc mobiles et les réseaux tolérants aux perturbations et aux délais, avec les principes de la mobilité contrôlée, selon lesquels un nœud est capable de participer directement à la détermination de sa trajectoire et à la réalisation de son déplacement. Nous définissons un système de forces virtuelles, comprenant diverses composantes répulsives, attractives, de frottement et d'alignement, pouvant être appliquées aux nœuds d'un réseau. Nous expliquons ensuite comment concrètement utiliser ces forces virtuelles dans un déploiement réseau, et nous spécifions une solution protocolaire utilisée selon diverses variations, que nous mettons en œuvre à travers des stratégies de mobilité contrôlée adaptées à différents environnements réseau. Nous prenons tout d'abord appui sur un scénario applicatif relatif à la lutte contre la progression d'une espèce invasive, le frelon asiatique, et décrivons un déploiement sur un réseau ad hoc sans fil reposant sur un ensemble de véhicules mobiles aériens qui exécutent une première stratégie de mobilité contrôlée. Nous cherchons à identifier les plages de valeurs pour les paramètres-clés de notre protocole à base de forces virtuelles aboutissant aux meilleures performances du réseau constitué par l'ensemble des nœuds considérés. Par la suite, nous introduisons également un scénario de déploiement de réseau temporaire de secours en situation de désastre, toujours de type ad hoc sans fil, puis nous présentons une analyse de la performance d'une seconde stratégie de mobilité contrôlée adaptée à cet environnement. Nous montrons en particulier comment cette stratégie se comporte lorsque le nombre de nœuds du réseau augmente. Nous abordons ensuite le contexte des réseaux utilisés en conditions défavorables et des mécanismes de tolérance aux perturbations. Nous cherchons ici à concevoir

un troisième type de stratégie de mobilité contrôlée utilisant conjointement des mécanismes de tolérance aux perturbations et aux délais et les principes de mobilité contrôlée afin d'augmenter significativement les performances du réseau. Nous analysons ensuite comment cette stratégie permet de transmettre une partie du trafic utilisateur avec des délais courts, lorsqu'une route de bout-en-bout est pleinement constituée le long d'une chaîne de communication, tandis que le reste du trafic est acheminé avec des délais longs, au moyen du protocole de routage tolérant aux délais.

Nous nous intéressons enfin aux besoins spécifiques issus des scénarios réseau abordés, et détaillons sous cet angle notre approche de sélection concrète d'une plate-forme aérienne répondant à l'ensemble des besoins matériels et logiciels. Nous abordons les problématiques d'assemblage, d'intégration et de validation d'un nœud mobile aérien adapté à l'ensemble des besoins exprimés.

Abstract

Throughout this thesis, we seek to propose and design optimized strategies that are adapted to a widespread class of use cases in which communications between network nodes may be disrupted by adverse deployment conditions, assuming that standard fault repair mechanisms are unable to address and mitigate the effects created by these disruptions. Such use cases include the applicative context of emergency communication networks, which are often met in the wake of disasters, or more generally after the occurrence of any unexpected event which may leave the existing networks of an affected area partially or even totally damaged. The aforementioned disruptions can be of different nature: they may result from a detrimental network dimensioning (e.g. low number of network nodes, excessive node scattering surface, insufficient radio communication range, ... with respect to the other considered deployment parameter values). They may also stem from external causes, e.g. the unexpected presence of obstacles on the area of interest, or the existence of extrinsic interference sources that may disturb the considered network. In general, it can be observed that given such disruptions, a network which is not inherently designed to operate in these conditions is likely to under-perform and, as a result, to offer a significantly decreased quality of experience to its users.

In this regard, we seek to compare our perception of the traditional concept of mobility as seen in common infrastructure, ad hoc or disruption- and delay-tolerant wireless networks with the principles of controlled mobility, according to which a network node may directly control its own movement and affect its trajectory accordingly. More precisely, we investigate the means to define a virtual force system which encompasses multiple repulsive, attractive, friction and alignment forces, all of which may be applied to network nodes in order to enforce this principle of controlled mobility. We then explain how virtual forces can concretely be implemented and used in a realistic network deployment, and we specify a protocol solution and its variations, which we enforce within controlled mobility strategies with the prospect that those prove best suited to the considered network environments.

We first take as an applicative background a scenario aiming to fight the spread of an invasive species, the Asian hornet, and we outline a practical deployment relying on a wireless ad hoc network formed with unmanned aerial nodes which all enforce our first proposed controlled mobility strategy. We then seek to identify the best value intervals for the key parameters of our virtual force-based protocol, anticipating that configured with these values, the deployed network will yield its best performance in terms of delays and packet delivery. Later, we introduce a scenario related to the deployment of an emergency communication network, still on the basis of wireless ad hoc network principles. We then present an analysis of how a second proposed controlled mobility strategy performs in this applicative environment. In particular, we show how this strategy behaves when the number of network nodes increases. At that point, we address the context of networks deployed in challenging conditions, and of the use of disruption- and delay-tolerant mechanisms. We aim here at designing a third type of strategy that jointly uses disruption- and delay-tolerant mechanisms as well as controlled mobility principles, in

order to significantly increase the overall network performance. We then investigate and explain how this strategy allows transmitting a fraction of the user traffic with short delays, when an end-to-end route is available along a communication chain, while the other fraction of the traffic is delivered with longer delays, with the support of delay-tolerant routing mechanisms.

Finally, we take an interest in the specific requirements derived from the aforementioned network scenarios, and with this viewpoint we detail the concrete selection process of a low altitude aerial platform that meets the specified hardware and software requirements. Lastly, we cover the specific issues related to the assembly, integration and validation of aerial nodes tailored to the complete set of expressed needs.

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Le contexte visé	3
1.1.1	Les réseaux mobiles ad hoc	4
1.1.2	Les réseaux difficiles et tolérants aux perturbations	6
1.2	Principaux objectifs poursuivis	7
1.3	Organisation de la thèse	7
2	État de l'art sur la mobilité contrôlée	9
2.1	Perception traditionnelle de la mobilité dans les réseaux sans fil	10
2.1.1	Taxonomie des motifs de mobilité couramment rencontrés	10
2.1.2	Propriété de prévisibilité des mobilités	16
2.1.3	Considérations de distribution spatiale des nœuds d'un réseau	17
2.2	Principes et formes de mobilité contrôlée	18
2.2.1	Principes généraux	18
2.2.2	Mécanismes de planification de trajectoire	18
2.2.3	Stigmergie et mécanismes bio-inspirés	19
2.2.4	Mobilité contrôlée par un système de forces virtuelles	20
3	Conception du protocole VFP	24
3.1	Définition d'un système de forces virtuelles	25
3.1.1	Forces d'attraction-répulsion	25
3.1.2	Force de frottement	27
3.1.3	Force d'alignement	28
3.1.4	Principes d'utilisation des forces virtuelles	32
3.2	Conception de la solution protocolaire VFP	33
3.2.1	Objet du message Balise	33
3.2.2	Description du message Balise simple	33
3.2.3	Description du message Balise étendu	34
3.2.4	Formation et maintenance d'une chaîne VFP	37
3.2.5	Variante VFPs, VFPe et VFPC du protocole VFP	42
4	Impact des paramètres-clés de VFPs	44
4.1	Contexte et scénario	45
4.1.1	Introduction	45
4.1.2	Le contexte d'étude	45
4.2	Scénario réseau	48
4.2.1	Types de nœuds	48
4.2.2	Motifs de mobilités	49
4.2.3	Déroulement du scénario	50
4.3	Incidence des paramètres-clés de VFPs sur la performance réseau	51
4.3.1	Hypothèses de simulation	51

4.3.2	Impact des tailles relatives des zones d'interaction	54
4.3.3	Impact du paramètre I d'intensité de force d'attraction/répulsion	64
4.3.4	Impact du coefficient de frottement Cx	66
4.3.5	Impact des seuils de distance	67
4.3.6	Enseignements	71
5	Utilisation et évaluation de VFPe dans un réseau spontané	72
5.1	Le contexte des réseaux rapidement déployables	73
5.2	Scénario réseau	75
5.2.1	Types de nœuds	75
5.2.2	Motifs de mobilité	76
5.3	Utilisation de VFPe dans un réseau spontané	76
5.3.1	Hypothèses de simulation	76
5.3.2	Incidence de la taille de contact entre les nœuds	77
5.3.3	Incidence du nombre de nœuds	80
5.3.4	Enseignements	83
6	Utilisation et évaluation de VFPC dans un réseau difficile	85
6.1	Contexte et scénario	86
6.1.1	Réseaux difficiles et mécanismes tolérants aux perturbations	86
6.1.2	Scénario réseau	87
6.2	Utilisation de VFPC dans un contexte DTN	87
6.2.1	Approches envisagées	87
6.2.2	Définition d'un cadre protocolaire inter-couches	88
6.2.3	Stratégies mises en œuvre	89
6.2.4	Hypothèses de simulation	90
6.2.5	Résultats de simulation	91
6.2.6	Enseignements	97
7	Choix architecturaux	103
7.1	Contexte et choix de mise en œuvre	104
7.1.1	Le contexte des plate-formes aériennes	104
7.1.2	Sélection d'une plate-forme adaptée à l'expérimentation	108
7.1.3	Spécification de l'architecture matérielle des nœuds	109
7.1.4	Principaux composants logiciels déployés	111
7.1.5	Phases de mise en œuvre, intégration et validation	112
7.2	Résultats d'expérimentation attendus	113
8	Conclusions et perspectives	115
8.1	Résultats et enseignements	116
8.2	Perspectives et travaux futurs	117
A	Liste des acronymes	132

Liste des figures

2.1	Système de classification des mobilités d'un nœud réseau	11
2.2	Représentation d'un exemple de marche aléatoire	12
3.1	Forces virtuelles d'attraction-répulsion exercées par un nœud	25
3.2	Orientation des forces virtuelles d'attraction-répulsion exercées sur un nœud	26
3.3	Orientation des forces virtuelles de frottement exercées sur un nœud	27
3.4	Nécessité de définir une force d'alignement pour orienter une chaîne	28
3.5	Informations disséminées pour la mesure des forces d'alignement	29
3.6	Détail de la construction des forces d'alignement sur deux nœuds-relais	29
3.7	Cas transitoires d'équilibre instable du à des projections superposées	30
3.8	Cas transitoire d'équilibre instable du à un alignement non ordonné	31
3.9	Le message Balise étendu et ses différents champs	35
3.10	Exemple de calcul du champ Temps	36
3.11	Scénario d'insertion d'un nouveau nœud-relais dans une chaîne existante	38
3.12	Messages Balise échangés lors de l'insertion d'un nœud-relais	39
3.13	Scénario de suppression d'un nœud-relais d'une chaîne existante	40
3.14	Messages Balise échangés lors de la suppression d'un nœud-relais	41
4.1	Technique de localisation d'un nid de frelon par intersection de directions	47
4.2	Principes de poursuite d'un frelon, données échangées entre UAV-P et Nc	49
4.3	Transmissions des données utilisateurs vers Nc	49
4.4	Représentation du déroulé du scénario	51
4.5	Impact de la valeur de d_f sur les zones d'interaction	54
4.6	Trajectoires des nœuds-relais et de poursuite, $d_f = 50$ m	56
4.7	Trajectoires des nœuds-relais et de poursuite, $d_f = 90$ m	56
4.8	Trajectoires des nœuds-relais et de poursuite, $d_f = 75$ m	57
4.9	PDR relatif au trafic CBR, selon d_f	58
4.10	Délai de bout-en-bout relatif au trafic CBR, selon d_f	58
4.11	PDR relatif au trafic CBR, selon d_f	60
4.12	Délai de bout-en-bout relatif au trafic CBR, selon d_f	60
4.13	Extrait de captures de paquets sur l'interface du nœud de poursuite	61
4.14	Trajectoires des nœuds-relais et de poursuite, $cd = 10$ kb/s	63
4.15	Trajectoires des nœuds-relais et de poursuite, $cd = 100$ kb/s	63
4.16	PDR relatif au trafic CBR, selon d_f et différentes valeurs de I	65
4.17	PDR relatif au trafic CBR, selon d_f et différentes valeurs de Cx	67
4.18	PDR relatif au trafic à débit constant (CBR), selon Th_{dmin} et Th_{dmax}	69
4.19	Insertions/retraits d'UAV-R dans une chaîne, selon Th_{dmin} et Th_{dmax}	69
4.20	Nombre moyen d'UAV-S de réserve, selon Th_{dmin} et Th_{dmax}	70
5.1	Aperçu des nœuds réseau déployés dans le scénario de secours considéré	75
5.2	PDR selon cs , pour quatre stratégies étudiées	79
5.3	Délai selon cs , pour quatre stratégies étudiées	79

5.4	PDR selon N , pour quatre stratégies étudiées	82
5.5	Délai selon N , pour quatre stratégies étudiées	82
6.1	Représentation du cadre protocolaire inter-couches.	88
6.2	Aperçu des stratégies mises en œuvre, ordonnées par fonctions	90
6.3	PDR selon N , pour huit stratégies étudiées	93
6.4	Délai selon N , pour huit stratégies étudiées	93
6.5	PDR selon t , pour huit stratégies étudiées, $N = 15$	94
6.6	Délai moyen selon t , pour huit stratégies étudiées, $N = 15$	95
6.7	Fonctions de distribution cumulative des délais de bout-en-bout. $N = 15$. .	96
6.8	PDR et délai selon t , pour VFPC et VFPC-RRM, $N = 15$	98
6.9	Répartition du délai moyen pour VFPC et VFPC-RRM, $N = 15$	98
7.1	Taxonomie simplifiée des véhicules aériens de type aérostat et aérodyne . .	105
7.2	Architecture matérielle générale de la plate-forme cible	110
7.3	Étapes d'intégration d'un des nœuds de prototypage	114

Liste des tableaux

2.1	Processus de décision markovien pour la modélisation d'un mouvement . .	13
2.2	Processus de décision utilisant des phéromones virtuelles	20
3.1	Le message Balise et ses différents champs	34
4.1	VFPs : principaux paramètres de simulation	53
5.1	VFPe : principaux paramètres de simulation	77
6.1	VFPc : principaux paramètres de simulation révisés	91

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1 Le contexte visé	3
1.1.1 Les réseaux mobiles ad hoc	4
1.1.2 Les réseaux difficiles et tolérants aux perturbations	6
1.2 Principaux objectifs poursuivis	7
1.3 Organisation de la thèse	7

1.1 Le contexte visé

Au cours des quinze dernières années, la couverture géographique des réseaux de communication s'est progressivement étendue, au point de quasiment pouvoir permettre un accès ubiquitaire à tout utilisateur de par le monde. À titre d'exemple, dans ce laps de temps, le taux de pénétration de l'Internet a été multiplié par sept, atteignant 43% de la population mondiale en 2015 [1]. De la même manière, c'est environ 95% de cette même population mondiale qui est maintenant couverte par un réseau **sans fil cellulaire de seconde génération (2G)**. Cependant, bien que ces observations revêtent un caractère encourageant quant à la capacité des réseaux à se globaliser, celles-ci ne peuvent pourtant pas occulter les profonds défis posés par le besoin, encore aujourd'hui, d'améliorer significativement les possibilités d'accès aux infrastructures réseau dans de multiples territoires mal ou non connectés. Si ces imperfections de couverture réseau ont de multiples causes, il faut néanmoins souligner qu'elles apparaissent le plus souvent dans des régions rurales, géographiquement reculées ou issues de pays en voie de développement manquant encore d'infrastructures performantes, réseaux de communication compris. Il devient alors nécessaire d'envisager le déploiement de ressources de communication alternatives, en substitution, afin de connecter les populations des régions concernées.

Au delà de ce contexte de distribution inhomogène des infrastructures de télécommunications sur les territoires, un problème similaire peut être observé dans le cas de la survenue de désastres ou plus généralement d'incidents non planifiés capables de laisser les réseaux d'une zone affectée partiellement ou totalement endommagés. Or, la survenue de tels événements demande naturellement une excellente coordination entre les diverses équipes de secours, de maintien de l'ordre et de réparation, et à ce titre ces dernières doivent pouvoir disposer de moyens de télécommunications robustes et performants, tout comme les populations directement affectées.

Dans l'ensemble des cas évoqués, le déploiement temporaire ou à plus long terme d'un réseau venant en complément d'une infrastructure de télécommunications à la couverture incomplète ou en substitution d'un réseau pour un temps endommagé, doit très souvent faire face à des problématiques similaires :

Les contraintes temporelles. Le déploiement du réseau ne suit pas toujours les règles d'ingénieries classiques relatives aux réseaux dits opérés, c'est-à-dire gérés par un opérateur de réseau fixe ou mobile. C'est le cas des réseaux que nous avons évoqués, pour lesquels la chronologie de déploiement habituelle (dimensionnement, planification radio s'il s'agit d'un réseau mobile, phase de déploiement avec sélection de la totalité des sites où seront localisés les équipements, paramétrage et optimisation de ces équipements) est fortement bousculée par des impératifs de différente nature. Un exemple manifeste est celui des réseaux de communications d'urgence, pour lesquels le temps de déploiement est un critère essentiel. En effet, le diminuer peut contribuer à sauver des vies dans une situation de post-catastrophe [2, 3, 4]. Au delà de cet exemple, les situations planifiées peuvent être elles-aussi très dépendantes de contraintes chronologiques : c'est le cas des réseaux déployés spécifiquement pour accompagner un événement temporaire dans une zone dénuée d'une infrastructure de télécommunications capable de fournir la capacité attendue [5]. Il s'agit en effet d'un contexte où, une fois que l'événement s'est achevé et que le réseau a fait son office, se pose souvent la question d'une rapide réutilisation des équipements ailleurs. Enfin, même les déploiements plus permanents, comme en particulier dans les territoires géographiquement reculés ou les zones peu densément couvertes des pays émergents, sont également soumis à des contraintes chronologiques. En effet, ces réseaux sont souvent déployés là où les réseaux traditionnels ne le sont pas encore. Lorsque ces derniers s'étendent géographiquement, la couverture des réseaux en substitution doit

être revue en conséquence [6], de manière à éviter de gaspiller les ressources réseau en substitution à travers des recouvrements de couverture réseau inutiles, voire nuisibles s'il s'agit de réseaux sans fil où les bandes de fréquences utilisées se chevauchent également.

Les contraintes économiques. Les réseaux déployés en zones dites *blanches*, c'est-à-dire non encore couvertes par un réseau terrestre de quelque nature que ce soit, sont souvent tributaires des conditions économiques sous-tendant ces déploiements. Si par exemple les territoires concernés sont ceux d'un pays émergent, la mise en place d'un réseau de nature commerciale dépendra intrinsèquement de la viabilité du modèle d'affaire associé, et donc indirectement de paramètres tels que la densité et la richesse des populations concernées. De plus, afin d'assurer une rentabilité pérenne aux opérateurs de ce réseau, ce dernier doit avoir été conçu pour offrir certaines qualités, notamment en termes de flexibilité, dynamique, légèreté et passage à l'échelle. En effet, ces propriétés peuvent permettre de réviser l'architecture du réseau, soit par exemple en augmentant le nombre d'équipements réseaux pour par exemple accompagner un accroissement de population, soit au contraire en redisant des équipements dont la position géographique n'est plus pertinente, par exemple parce que d'autres réseaux ont pu entre temps être déployés autour de ces positions. Et bien-sûr, dans ce contexte économique, le caractère abordable du réseau reste un critère essentiel pour s'assurer de la rentabilité du modèle d'affaire associé, ce qui amène de nombreuses contraintes sur les coûts et les performances des équipements réseau, et indirectement sur la qualité du service offert aux utilisateurs des régions concernées.

Les contraintes structurelles. Il est concevable que la nature d'un désastre et l'ampleur des dommages constatés sur les différentes infrastructures (de télécommunications ou non) dans la zone affectée auront un impact important sur l'étendue et la durée du déploiement d'un réseau de communications d'urgences. Il en va de même dans les réseaux opérés, où certains segments réseaux, sans pour autant être sous l'effet d'un désastre, peuvent être localement en situation de dysfonctionnement à la suite d'une perturbation externe, comme par exemple la survenue de coupures de courant ou les effets délétères d'une opération de maintenance programmée d'un équipement spécifique du réseau. Dans toutes ces situations, un réseau déployé temporairement pour se substituer ou compléter les ressources insuffisantes de l'infrastructure existante, devrait lui-même posséder, par nature, des qualités de résistance aux perturbations, de manière à ne pas tomber lui-même sous l'effet des contraintes structurelles évoquées.

Afin de prendre en compte ces contraintes, les réseaux que nous allons considérer dans les chapitres suivants présentent ainsi un certain nombre de propriétés utiles pour leur permettre d'atteindre, dans les situations évoquées, un niveau de performance satisfaisant. En particulier, deux grands types de réseaux, que nous allons introduire dans la suite de ce chapitre, possèdent de telles propriétés de flexibilité, de dynamique, de robustesse, de légèreté et de capacité de passer à l'échelle : il s'agit des réseaux mobiles ad hoc et des réseaux tolérants aux perturbations.

1.1.1 Les réseaux mobiles ad hoc

À l'inverse des réseaux mobiles cellulaires, qui supposent le déploiement de stations de base pour connecter les terminaux mobiles des utilisateurs à l'infrastructure des opérateurs, les réseaux mobiles ad hoc sont eux capables de s'organiser automatiquement (on les appelle parfois à ce titre *réseaux spontanés*) sans nécessiter d'infrastructure

prédéfinie ni point de centralisation. Selon ce principe, tous les systèmes ou nœuds mobiles du réseau sont capables de communiquer entre eux au travers de l'utilisation de leurs interfaces de communication sans fil. En outre, étant généralement chacun doté de motifs de mobilité non spécifiés, la topologie du réseau ainsi formée est elle-même dynamique, avec des déconnexions de liens de communication pouvant survenir de manière imprévisible. De plus, du fait de la portée radio limitée des interfaces de communication, un nœud devant transmettre à un nœud destination des données n'aura pas forcément ce dernier dans son voisinage radio immédiat. Dans un **réseau ad hoc mobile (MANET)**, afin de répondre à cette problématique, tout nœud est doté de la capacité de relayer les paquets de données reçus des autres nœuds en direction de leur destination. À ce titre, plusieurs nœuds peuvent être successivement utilisés comme routeurs intermédiaires. Les **MANET** sont donc susceptibles de régulièrement construire et maintenir des routes à sauts multiples entre deux quelconques nœuds du réseau, si la topologie du réseau le permet (en effet, dans ces conditions, tout nœud peut à certains instants se retrouver isolé du reste du réseau, sans possibilité de transmettre des données ni d'en recevoir).

L'utilisation des **MANET** a été envisagée dans de nombreux contextes applicatifs. Ils sont par exemple utilisés dans les situations précitées de post-désastre ou d'incidents non planifiés, nécessitant le déploiement d'un réseau de communications d'urgence [7]. Ils se sont également avérés utiles dans une perspective militaire, où toute infrastructure peut être perçue comme un point de faiblesse potentielle [8]. Dans ce contexte, le déploiement d'un réseau **MANET** permet d'assurer avantagement la communication entre différentes unités mobiles, sans le recours d'entité centralisée et dans des conditions fortement dynamiques. Par la suite, plusieurs domaines spécifiques, où les principes des réseaux ad hoc y ont trouvé un écho particulier, ont permis de spécialiser les propriétés des **MANET** aux environnements applicatifs étudiés, et de décliner des solutions spécifiques à ces contextes. On peut par exemple citer :

- Les **réseaux de capteurs sans fil (WSN)** sont des ensembles de nœuds appelés capteurs, dotés à la fois d'unités de traitements et de mesures, aptes à lire localement ces mesures et, grâce à une interface de communication sans fil, à les transmettre vers une destination prédéfinie. Cette destination peut par exemple être un puits de données, qui est généralement un nœud placé dans ou à proximité de la zone où sont dispersés les capteurs. Les **WSN**, dont on trouve des applications concrètes dans de nombreux domaines comme les déploiements industriels (ex. surveillance de l'environnement et suivi logistique [9]), militaires (ex. détection d'intrusion et dispersion de capteurs sur champ de bataille [10]) ou le contexte de la ville dite intelligente [11], partagent avec les **MANET** de nombreuses propriétés et contraintes. Parmi celles-ci, on peut distinguer le fait de ne pas s'appuyer sur une infrastructure et d'être constitué de nœuds avec une autonomie énergétique limitée. En conséquence, les problématiques de routage sans fil à sauts multiples sont apparentées et nombre de protocoles sont originellement issus du domaine des **MANET**.
- Les **réseaux maillés sans fil (WMN)** ont également des propriétés proches de celles des **MANET**, tout en se différenciant sur quelques points-clés : en premier lieu, les nœuds constitutifs d'un **WMN** sont souvent des routeurs sans fil à mobilité réduite et généralement non énergétiquement limités. De plus, là où le trafic d'un **MANET** n'est pas orienté puisque le rôle des nœuds n'y est pas différencié, dans un **WMN** en revanche les nœuds échangent avant tout des données avec des passerelles d'accès à l'Internet. Ici également, de nombreux protocoles sont issus du contexte des **MANET**, bien que les **WMN** fassent l'objet d'actions de normalisation, en particulier de la part de l'IEEE, avec 802.11s [12], une extension spécifique aux réseaux maillés, qui depuis 2012 a directement été incorporée dans la norme IEEE 802.11. Outre, d'un point de vue historique, leur intérêt applicatif pour les communications militaires,

les WMN sont également appropriés pour le déploiement de réseaux d'entreprise, urbains et domestiques [13].

- Les réseaux ad hoc véhiculaires (VANET) sont également apparentés aux réseaux MANET et partagent avec ces derniers de nombreuses propriétés. Cependant, les nœuds véhiculaires constitutifs des VANET ne sont généralement pas limités en termes énergétiques ni en ce qui concerne les capacités de calcul et de stockage des véhicules. En revanche, ces derniers sont la plupart du temps soumis à des modèles de mobilité spécifiques. Enfin, du fait des services relatifs à la sécurité routière ou aux applications multimédia embarquées, délai et bande passante sont des métriques importantes dans les VANET, qui requièrent donc des solutions de routage adaptées.
- D'autres réseaux proches mais distincts des MANET ont également été identifiés ces dernières années. On peut en particulier en citer deux types : d'une part, les réseaux réseaux sans fil sous-marins (UWN) traitent de la problématique du déploiement de réseaux ad hoc sans fil sous l'eau, en tenant compte des contraintes de ce milieu et en utilisant les principes de propagation des ondes acoustiques pour la transmission de données entre nœuds du réseau UWN. Et, plus proche des contextes applicatifs évoqués dans cette thèse, les réseaux ad hoc sans fil déployés dans un contexte aérien sont parfois nommés réseaux ad hoc aériens (FANET) [14]. Ces derniers se distinguent par le fait de posséder une faible densité de nœuds ; en revanche, ces nœuds possèdent souvent eux-mêmes une vitesse élevée ainsi qu'un nombre relativement important de degrés de liberté, ce qui provoque des motifs de mobilité spécifiques. De plus, l'altitude à laquelle sont déployés ces nœuds amène une forte probabilité pour que les communications soient en visée directe (LOS) et de longue portée.

1.1.2 Les réseaux difficiles et tolérants aux perturbations

Dans le contexte de cette thèse, on désigne par *réseau difficile* [15] tout *déploiement* au sein duquel les communications entre nœuds sont fortement pénalisées par des conditions défavorables, que ces dernières soient intrinsèques ou externes au réseau. On peut remarquer que cette terminologie ne désigne par tant la nature ou les propriétés du réseau lui-même que les conditions, ici délétères, dans lesquelles le réseau est utilisé. Ainsi, on peut qualifier le déploiement d'un réseau MANET de réseau difficile pour autant que les nœuds aient des difficultés importantes à communiquer entre eux et que la performance observée du réseau (par exemple au moyen de métriques de performance préalablement définies) soit grandement affectée par les perturbations constatées. Quant aux perturbations elles-mêmes, elles peuvent être de différente nature : elles peuvent par exemple être provoquées par un dimensionnement défavorable (ex. nombre de nœuds trop faible, surface de dispersion des nœuds trop importante, portée des interfaces de communication sans fil trop réduite, ... en regard des autres paramètres de dimensionnement considérés). Elles peuvent aussi être provoquées par des causes externes, comme par exemple la présence non anticipée d'obstacles ou la survenue de sources d'interférences extérieures au réseau considéré. De manière générale, on constate qu'en présence de telles perturbations, un réseau non conçu pour fonctionner dans de telles conditions peut voir ses performances et la qualité d'expérience de ses utilisateurs baisser significativement. En revanche, les techniques de *réseau tolérant aux délais et aux perturbations* (DTN) ont été conçues pour gérer efficacement la transmission des paquets de données dans le cas de perturbations. En effet, en cas de conditions difficiles, comme par exemple lors de la survenue d'une connectivité réseau intermittente, ces réseaux restent, par construction, tolérants aux perturbations. Il n'utilisent pas, comme les MANET, un

principe de routage reposant seulement sur la détermination d'un chemin à sauts multiples de bout-en-bout, mais s'appuient également sur des mécanismes permettant aux nœuds, comme nous le verrons plus en détail dans cette thèse, de pouvoir stocker et transporter les paquets de données reçus lors de leur déplacement.

1.2 Principaux objectifs poursuivis

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux cas d'usages pour lesquels les communications entre les nœuds d'un réseau sont susceptibles d'être fortement perturbées par des conditions de déploiement défavorables, sans que les mécanismes standards de réparation de panne prévus pour ce réseau puissent convenablement traiter et résorber les effets de ces perturbations. Il s'agit typiquement des conditions rencontrées dans les réseaux difficiles que nous venons d'introduire. Sur la base de ce contexte, nous cherchons à proposer des stratégies d'optimisation protocolaire et architecturale amenant une amélioration significative des performances des réseaux concernés. Pour ce faire, nous cherchons à comparer la perception que nous avons traditionnellement de la mobilité dans les réseaux sans fil de type [MANET](#) et [DTN](#), avec les principes de la mobilité contrôlée, selon lesquels un nœud est capable de participer directement à la détermination de sa trajectoire et à la réalisation de son déplacement. Notre objectif est ici d'étudier et évaluer dans les contextes évoqués la performance d'une forme spécifique de mobilité contrôlée, s'appuyant sur un système de forces virtuelles.

1.3 Organisation de la thèse

Le reste de ce document est structuré de la manière suivante : dans le [Chapitre 2](#), nous comparons la perception que nous avons traditionnellement de la mobilité dans les réseaux sans fil, en particulier dans les [MANET](#) et les [DTN](#), avec d'autres principes de mobilité, selon lesquels un nœud est capable de participer directement à la détermination de sa trajectoire et à la réalisation de son déplacement. Nous introduisons ainsi les principes et les formes les plus répandues de mobilité contrôlée, parmi lesquelles nous détaillons les mécanismes de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles, qui sont l'objet principal de notre étude, à travers les chapitres suivants de ce document. Puis, dans le [Chapitre 3](#), nous nous attachons à définir un système de forces virtuelles, comprenant diverses composantes répulsives, attractives, de frottement et d'alignement, pouvant être appliquées aux nœuds d'un réseau. Nous expliquons ensuite comment concrètement utiliser ces forces virtuelles dans un déploiement réseau, et nous spécifions une solution protocolaire, appelée VFP (*Virtual Force-based Protocol*). Ce protocole, utilisé selon diverses variations, est à l'origine de l'ensemble des stratégies de mobilité contrôlée que nous présentons dans différents environnements réseau dans les chapitres suivants.

En particulier, dans le [Chapitre 4](#), nous prenons l'exemple d'un scénario applicatif relatif à la lutte contre la progression d'une espèce invasive, le frelon asiatique, et mettons en place un déploiement réseau [MANET](#) s'appuyant sur un ensemble de véhicules mobiles aériens, sur lesquels nous déployons en outre une stratégie de mobilité contrôlée, nommée VFPs, mettant en œuvre notre protocole VFP. Nous cherchons à identifier les plages de valeurs pour les paramètres-clés de VFPs aboutissant aux meilleures performances du réseau constitué par l'ensemble des nœuds considérés. Par la suite, dans le [Chapitre 5](#), nous introduisons un scénario de déploiement de réseau temporaire de secours en situation de désastre, toujours de type [MANET](#), puis nous présentons une analyse de la performance d'une stratégie de mobilité contrôlée utilisant le protocole VFP et adaptée à cet environnement. Nous montrons en particulier comment cette stratégie,

nommée VFPe, se comporte lorsque le nombre de nœuds du réseau augmente. Dans le Chapitre 6, nous nous intéressons cette fois au contexte des réseaux difficiles et des mécanismes tolérants aux perturbations. Sur la base du même scénario réseau qu’au chapitre précédent, nous cherchons à concevoir une stratégie de mobilité contrôlée, nommée VFPC, utilisant conjointement des mécanismes DTN et les principes de mobilité contrôlée afin d’augmenter significativement les performances, dans des conditions de déploiement identiques, par rapport à la stratégie étudiée au chapitre précédent. Nous voyons enfin dans ce chapitre comment VFPC permet de transmettre une partie du trafic utilisateur avec des délais courts, lorsqu’une route de bout-en-bout est pleinement constituée le long d’une chaîne de communication, tandis que le reste du trafic est acheminé avec des délais longs, au moyen du protocole DTN.

Dans le Chapitre 7, nous détaillons ensuite le contexte des plate-formes aériennes, puis nous nous intéressons aux besoins spécifiques issus des scénarios réseau des chapitres précédents, et exposons sous cet angle notre approche de sélection d’une plateforme répondant à l’ensemble de ces besoins, qu’ils soient matériels ou logiciels. Nous abordons pour clore ce chapitre la problématique d’assemblage, d’intégration et de validation d’un nœud mobile aérien adapté à l’ensemble des besoins exprimés dans les scénarios réseau présentés dans les chapitres précédents. Nous pouvons ensuite dans le dernier chapitre aborder nos éléments de conclusion, et donner un ensemble de perspectives à l’issue de la réalisation de ces travaux de thèse.

Chapitre 2

État de l'art sur la mobilité contrôlée

Sommaire

2.1 Perception traditionnelle de la mobilité dans les réseaux sans fil	10
2.1.1 Taxonomie des motifs de mobilité couramment rencontrés	10
Les modèles de mobilité aléatoire	11
Les modèles avec dépendances	13
Les modèles déterministes	16
2.1.2 Propriété de prévisibilité des mobilités	16
2.1.3 Considérations de distribution spatiale des nœuds d'un réseau	17
2.2 Principes et formes de mobilité contrôlée	18
2.2.1 Principes généraux	18
2.2.2 Mécanismes de planification de trajectoire	18
2.2.3 Stigmergie et mécanismes bio-inspirés	19
2.2.4 Mobilité contrôlée par un système de forces virtuelles	20
Forces virtuelles avec un objectif de répartition géographique	21
Forces virtuelles avec un objectif de communication entre nœuds	22

La mobilité représente une dimension essentielle des activités de recherche exposées dans ce manuscrit. On peut en expliquer le caractère central par le fait qu'au contraire de ce qui peut être constaté au cours du processus de mise en place d'une infrastructure de télécommunications traditionnellement opérée, s'appuyant en particulier sur des phases préalables de planification radio et de dimensionnement relatifs à la localisation finale qu'auront les équipements du réseau lors de leur déploiement, les scénarios auxquels nous allons nous intéresser reposent sur une vision évolutive du déploiement des nœuds du réseau. En effet, dans ce dernier cas, le déploiement des nœuds doit être perçu comme une action continue sur une période d'observation spécifiée pendant laquelle, à chaque instant, il est attendu que le réseau soit opérationnel et que la qualité d'expérience qu'il fournit à ses utilisateurs soit la meilleure possible. En revanche, l'atteinte de cet objectif applicatif est ici significativement compliquée par le fait que le besoin de connectivité réseau démarre dès le début de la période d'observation, et coïncide avec une topologie réseau initiale ne permettant pas d'assurer durablement cette connectivité, du fait du nombre limité des nœuds et de leur placement généralement non adapté en regard de la surface de déploiement et du besoin de connectivité considéré. Face à l'expression de ce problème, nous envisageons la mobilité des nœuds, dans le cadre de cette thèse, comme un principe facilitant la formation d'une topologie pouvant s'avérer adaptée aux besoins utilisateurs signalés dans le réseau.

Dans ce chapitre, nous poursuivons deux objectifs : d'une part, nous donnons, dans la Sous-section 2.2.4, une définition du concept de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles, que nous allons abondamment employer dans les chapitres suivants, ainsi qu'un panorama général des travaux antérieurs réalisés autour de ce concept. D'autre part, nous introduisons progressivement cette forme de mobilité, en la ressituant dans le cadre plus vaste des différentes mobilités que l'on peut rencontrer dans les principaux réseaux de nœuds mobiles. L'objet de la première partie de ce chapitre est donc de dresser une taxonomie concise des formes de mobilité pertinentes dans ce contexte, puis de détailler progressivement les niveaux de classification amenant à la notion de mobilité contrôlée reposant sur l'utilisation de forces virtuelles.

2.1 Perception traditionnelle de la mobilité dans les réseaux sans fil

Nous nous intéressons dans un premier temps aux formes couramment rencontrées de mobilité dans les réseaux MANET et DTN, tels que nous les avons tous deux introduits dans le chapitre précédent. Il est nécessaire de souligner que dans cette section, nous gardons une vision générique de la notion de nœud mobile : nous assimilons en effet ici un nœud à un équipement de télécommunications doté d'une capacité de déplacement lui permettant de parcourir un sous-ensemble de la surface ou du volume d'exploration.

2.1.1 Taxonomie des motifs de mobilité couramment rencontrés

Une remarque préalable au sujet d'une quelconque mobilité rencontrée dans un environnement de déploiement réaliste est qu'elle rentrera difficilement, dans la totalité du motif observé, dans un système de classification existant. En effet, de par leur variété et leur complexité, les mobilités *réelles* apparaissent souvent impropres à une caractérisation totalement fidèle et exhaustive. En revanche, il est plus aisé de s'appuyer sur des *modèles de mobilité* permettant de rendre compte de mouvements caractéristiques, afin de déterminer à quel modèle un mouvement réel est apparenté. À ce sujet, la classification des différents modèles de mobilité observés dans les réseaux auto-organisés comme

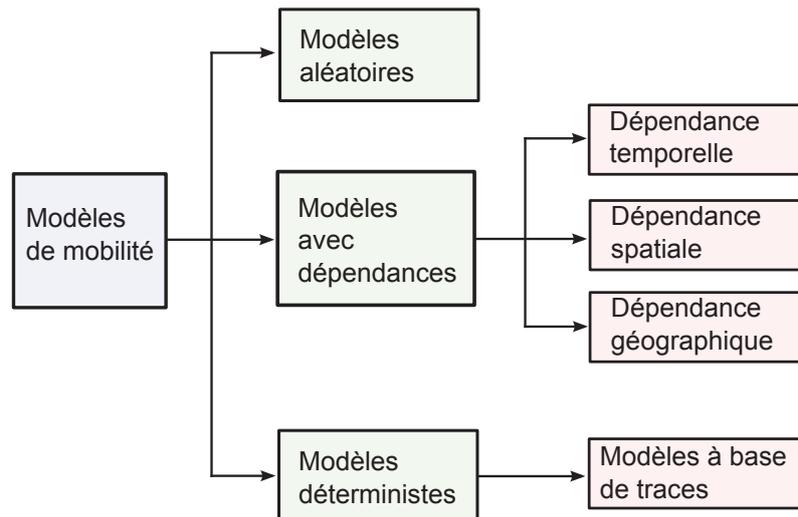


FIGURE 2.1 – Vue simplifiée d'un système de classification des mobilités d'un nœud réseau.

les réseaux MANET et DTN est en général structurée selon deux embranchements principaux : les modèles de mobilité aléatoire et les modèles avec dépendance, que celle-ci soit par exemple temporelle, spatiale ou géographique [16, 17, 18]. On peut rajouter cependant, comme illustré dans la Fig.2.1, un troisième embranchement, celui des modèles déterministes, cherchant au contraire à tenter de mieux capturer la complexité des mouvements en s'appuyant par exemple sur l'enregistrement préalable de la trajectoire d'un nœud en situation de déploiement.

Les modèles de mobilité aléatoire

Ces modèles représentent des nœuds dont les vitesses, coordonnées de destination et directions sont choisies de manière aléatoire. Dans ce large ensemble de modèles, trois ont été particulièrement étudiés et utilisés : les modèles de marche aléatoire (MA), à points de repère aléatoires (RWP) et à directions aléatoires (RD).

Le modèle MA. Il s'agit de l'un des modèles de mobilité les plus utilisés avec RWP pour représenter, lors de simulations, le déplacement des nœuds d'un réseau auto-organisé. Plus généralement, c'est un modèle préexistant aux réseaux de télécommunications, à l'origine construit et utilisé dans le but de caractériser le mouvement brownien d'une particule immergée dans un fluide [19]. Selon ce modèle, un nœud doté de la capacité de se mouvoir dans une zone d'exploration Z_e se déplace de ses coordonnées actuelles vers de nouvelles coordonnées en choisissant une direction dans $[0, 2\pi]$ et une vitesse dans un intervalle $[v_{min}, v_{max}]$, les distributions de directions et de vitesses pouvant être uniformes ou non. Lorsque l'on cherche à mettre en œuvre une telle mobilité dans un contexte de simulation, chaque déplacement constitue une époque, c'est-à-dire une itération. Celle-ci est calculée sur la base d'une distance constante parcourue par le nœud (on dit alors que le MA est en *mode distance*), soit sur la base d'un temps constant (on dit que le MA est en *mode temps*) entre deux changements de direction. Un nœud arrivant en bordure de surface Z_e rebondit avec un angle dépendant de la direction précédente. Il continuera sur cette trajectoire le temps de finir l'époque en cours. La Fig. 2.2 en donne une représentation d'exemple que nous avons obtenue au moyen du simulateur réseau ns-3 [20] dans sa version 3.23. Ici, la marche aléatoire est configurée en mode temps, les nœuds parcourant 10 m avant de changer d'époque.

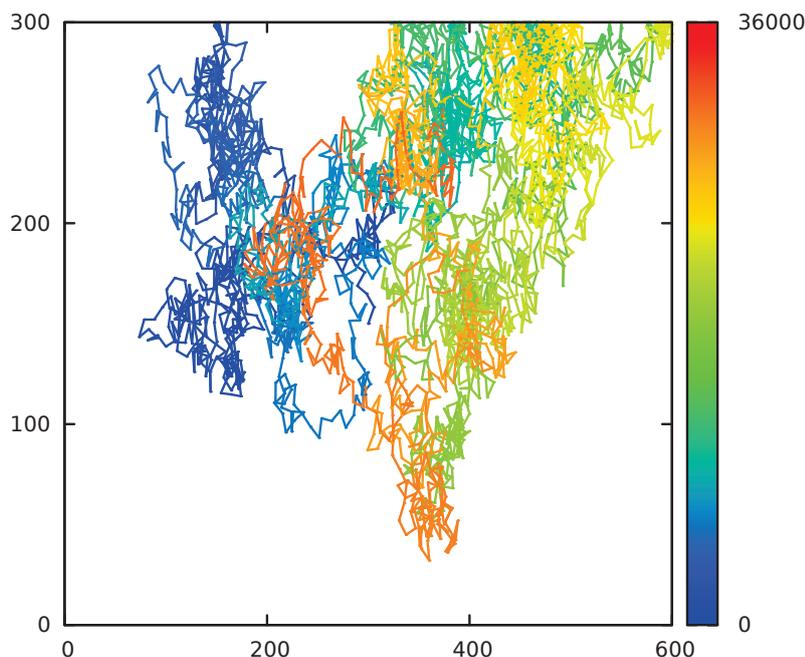


FIGURE 2.2 – Représentation d'un exemple de **MA**, en mode distance (10 m), sur une surface Z_e de 600×300 m². Les trajectoires du nœud entre deux époques successives sont colorées au moyen de la carte de couleurs correspondant au temps de simulation, de 0 à 36000 s.

Le modèle RWP. Les modèles **MA** et **RWP** sont des modèles proches, avec cependant quelques différences. À chaque époque, un nœud possédant un motif de mobilité de type **RWP** change en effet de trajectoire, non pas en choisissant une direction, mais une nouvelle position. Plus précisément, ce nœud détermine de nouvelles coordonnées dans la zone d'exploration Z_e vers lesquelles se déplacer à une vitesse choisie dans un intervalle $[v_{min}, v_{max}]$. De la même manière, les deux distributions aléatoires peuvent être uniformes (ce qui est la plupart du temps le cas) ou non. De plus, les nœuds peuvent marquer un temps d'arrêt entre chaque époque. Ce modèle est très souvent utilisé lors de simulations, en partie parce qu'il permet aux nœuds de disposer d'un motif de mobilité relativement réaliste, en particulier lorsque ceux-ci représentent des utilisateurs supposés se déplacer à des vitesses modérées, dans le contexte applicatif de manifestations en intérieur par exemple, où ce motif de mobilité peut raisonnablement imiter le mouvement d'un piéton passant d'un point d'intérêt à l'autre [21]. Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons également le motif de mobilité **RWP** lorsque nous souhaitons simplement faire parcourir à un ensemble de nœuds une zone d'exploration. Ce sera le cas dans le Chapitre 4 avec les nœuds dits *supplémentaires*, et dans les Chapitres 5 et 6, avec ceux que nous désignerons par les termes *nœuds de trafic* et *nœuds de surveillance*, à l'exception du Paragraphe 6.2.5 dans lequel ces derniers possèdent une mobilité plus complexe).

Le modèle RD. Ce modèle, proposé par Belding [22], est proche de **RWP**, mais diffère sur la manière dont est sélectionnée une direction en début de nouvelle époque : dans un premier temps, **RD** détermine une direction dans un intervalle uniformément distribué $[0, 2\pi]$, puis un point à l'intersection avec la bordure de la surface d'exploration Z_e . Le nœud se déplace jusqu'à ces coordonnées, marque un temps de pause, puis choisit à nouveau une direction dans un intervalle cette fois-ci uniformément distribué dans $[0, \pi]$ (on suppose en effet dans l'étude originale que Z_e est rectangulaire ; un tel intervalle de direction permet donc d'atteindre, depuis la bordure, n'importe quel point de cette surface). On notera que la détermination des vitesses est réalisé de manière similaire à celle

de *RWP*. De plus, plusieurs extensions notables de ce modèle ont été récemment proposées, dont le *modèle à changements progressifs de direction (ST)* [23], qui permet de définir des trajectoires relativement réalistes, notamment dans le contexte aérien. Selon le modèle *ST* en effet, un nœud changeant de direction détermine un point appartenant à la direction perpendiculaire à sa direction en cours, puis tourne autour jusqu'à un prochain changement de direction, produisant ainsi une série de mouvements en arcs de cercle.

Les modèles avec dépendances

La caractéristique principale de cette catégorie de modèle est que le calcul d'une nouvelle trajectoire d'un nœud ne s'appuie pas simplement sur la détermination de valeurs dans des intervalles, comme c'est le cas avec les modèles aléatoires. Ici, cette nouvelle trajectoire dépend d'un facteur de corrélation qui peut être de différente nature : il peut en particulier s'agir d'une dépendance temporelle, spatiale ou géographique.

Les modèles avec dépendance temporelle. De manière générale, avec ce type de motif de mobilité, aussi parfois appelé modèle à mémoire [18], le calcul de la nouvelle trajectoire d'un nœud dépend d'un ou plusieurs de ses états antérieurs. Parmi ceux-ci, le *modèle de mobilité de Gauss-Markov* [24] est souvent utilisé dans les études où il est attendu que les trajectoires suivies par les nœuds soient relativement réalistes en regard des contraintes physiques imposées sur ces derniers, qu'il s'agisse par exemple de limitations en termes d'accélération, de vitesse et de mouvements. En effet, la vitesse d'un nœud est ici décrite par un processus de Gauss-Markov et permet d'aboutir à des motifs de mobilité pour lesquels les trajectoires sont dénuées de brusques changements de direction et de vitesse. En conséquence, ce modèle est régulièrement utilisé dans des études supposant la mise en œuvre concrète de véhicules roulants robotisés ou aériens [25, 26], pour lesquels il faut tenir compte des contraintes sur les trajectoires suivies. Dans la même optique, des extensions à ce modèle, comme le *modèle de Gauss-Markov Amélioré* [27], ont été proposées afin de rendre les trajectoires suivies encore plus réalistes, notamment à l'approche des bordures de la surface d'exploration [28].

D'autres travaux reposent sur l'utilisation d'un processus de décision markovien pour concevoir leur propositions de modèle de mobilité avec dépendance temporelle. C'est en particulier le cas de l'étude de Kuiper [29], pour lequel, à chaque intervalle de temps prédéfini, une action est décidée sur la base de probabilités dépendant de l'action précédente. Cette étude applique par exemple cette approche à des véhicules aériens par une modélisation sommaire de la gouverne de direction, c'est-à-dire la mise en œuvre de palonniers afin de contrôler l'angle de lacet, qui est l'angle issu de la rotation de ces véhicules autour d'un axe vertical. La Table 2.1 illustre le processus de décision, permettant d'aboutir à une action parmi 3 possibles : virer à gauche, continuer tout droit et virer à droite. Comme on le voit, les probabilités liées à la décision de l'action dépendent de l'action précédente.

TABLEAU 2.1 – Modélisation du mouvement d'un véhicule aérien au moyen d'un processus de décision markovien [29]

Dernière action	Probabilité de l'action		
	Virer à gauche	Aller tout droit	Virer à droite
Virer à gauche	0,7	0,3	0
Aller tout droit	0,1	0,8	0,1
Virer à droite	0	0,3	0,7

Les modèles avec dépendance spatiale. Avec ce type de motif de mobilité, on suppose que le mouvement d'un nœud peut dépendre de celui d'autres nœuds du réseau. En conséquence, l'utilisation d'un tel facteur de corrélation spatiale entre différents nœuds a largement été utilisé, ces dernières années, pour modéliser des mobilités résultant de l'appartenance à un groupe, comme on peut l'observer dans des contextes applicatifs aussi divers que le déplacement d'une équipe de secours en situation de post-désastre, d'une unité de combat dans un environnement militaire, d'un ensemble de visiteurs rassemblés autour d'un guide ou d'un orateur, d'un essaim de véhicules aériens sans équipage évoluant en formation groupée, etc. C'est le cas du *modèle de mobilité d'un groupe avec point de référence (RPGM)* [30], pour lequel est défini un centre pour chaque groupe de nœuds. Ce centre peut correspondre à la position physique d'un nœud de commandement ou à des coordonnées logiques, par exemple obtenues en pondérant les positions de tous les nœuds du groupe. Ces derniers possèdent un motif de mobilité à deux composantes : la première, qui reproduit le mouvement du centre du groupe, leur permet d'accompagner ce centre. Elle est complétée par une seconde composante, aléatoire cette fois-ci. On notera que ce modèle, souvent utilisé pour transcrire des mobilités simples de groupe, a été conçu sur la base d'une étude antérieure [31] ayant proposé également une mobilité de groupe, le *modèle aléatoire corrélé exponentiellement (ECR)*, généralement considéré comme difficile à concrètement mettre en œuvre, lorsqu'un motif particulier de mobilité de groupe est souhaitée.

Le *modèle de mobilité en poursuite* [32] propose une extension du modèle *RPGM* adapté à la poursuite d'une cible de la part d'un groupe de nœuds : dans ce cas, c'est le nœud-cible qui joue le rôle du centre de groupe, à ceci près qu'ici, les nœuds tendent à se diriger vers la cible et non plus simplement reproduire le mouvement du centre de groupe. Comme dans *RPGM* toutefois, les nœuds du groupe sont soumis à une deuxième composante de mouvement, aléatoire cette fois-ci. Dans une optique similaire, des motifs de mobilité proches dans leur conception ont été proposés. Il s'agit en particulier du *modèle de mobilité de communauté nomade* [32], qui est également très proche de *RPGM*, et s'appuie sur la détermination d'un centre de groupe logique dont le déplacement fournit aux nœuds du groupe un déplacement de référence, commun, auquel est ajouté un déplacement aléatoire, individuel. On peut citer également le *modèle de mobilité en colonne* [32], qui adapte le modèle *RPGM* à une topologie initiale du groupe de nœuds en ligne. Le mouvement des nœuds est aussi calculé sur la base d'un déplacement de groupe commun et d'un déplacement aléatoire individuel. Ce dernier motif de mobilité cherche à modéliser le déplacement d'un groupe de recherche lorsqu'une zone donnée doit être méthodiquement balayée, afin par exemple de localiser une ou plusieurs choses ou personnes d'intérêt.

Enfin, les mobilités reposant sur l'interaction locale entre nœuds voisins, comme les mobilités contrôlées à base de forces virtuelles que nous détaillerons dans la Sous-section 2.2.4, peuvent être naturellement perçues comme des mobilités avec dépendance spatiale. Nous verrons également que lorsque les interactions entre les nœuds se font par le biais d'un signal dispersé dans la surface d'exploration, comme c'est le cas avec le principe de stigmergie et l'utilisation de phéromones virtuelles que nous présenterons également dans la section suivante, la distinction entre modèle avec dépendance spatiale et modèle avec dépendance géographique est plus délicate à réaliser.

Les modèles avec dépendance géographique. Ces modèles se distinguent des modèles avec dépendance spatiale précédemment présentés, dans la mesure où l'objectif principal est ici de modéliser des restrictions géographiques présentes sur la zone d'exploration. Ce type de modèle permet de prendre en compte les contraintes sur les nœuds lors de déploiements concrets. Il peut par exemple s'agir du déplacement de véhicules sur des routes,

de piétons en environnement urbain, d'équipes de secours en situation de déplacement sur une zone affectée par un désastre où sont dispersés des obstacles, etc. Parmi les modèles couramment utilisés pour retranscrire une mobilité en situation urbaine, on peut noter le *modèle de mobilité selon des chemins (Pathway Mobility Model)* [33], qui s'appuie sur l'utilisation de graphes aléatoires : les sommets représentent ici les maisons et immeubles, tandis que les arêtes sont interprétées comme les routes et chemins reliant les divers bâtiment de la ville. Dans la même optique, les *modèles Freeway* et *Manhattan* [34] sont également souvent utilisés. Du point de vue de la classification illustrée par la Fig. 2.1, il est de plus intéressant de souligner que ce sont deux modèles hybrides, dans la mesure où ils considèrent plusieurs types de dépendance. Le modèle *Freeway* permet par exemple de représenter la mobilité de véhicules sur plusieurs voies de circulation routière, c'est donc de ce point de vue un modèle à dépendance géographique puisque le déplacement des nœuds est contraint par les routes ainsi modélisées. En outre, la vitesse des nœuds dépend de leur vitesse à des temps précédents, et celle-ci est de plus dépendante des nœuds voisins : cette dernière contrainte permet de modéliser le fait que la vitesse d'un véhicule ne peut dépasser celle d'un second véhicule que le premier suit immédiatement sur une route, sous peine de collision. Ainsi, ce modèle peut aussi être perçu comme un modèle à dépendances temporelle et spatiale. Il en est de même pour le modèle *Manhattan*, qui se distingue par sa topologie en grille pour représenter simplement un centre urbain, l'utilisation de doubles voies de directions opposées pour modéliser deux sens de circulation, et le fait que selon ce modèle, l'utilisation d'un processus de décision markovien permet en plus aux nœuds, lorsqu'ils rencontrent une intersection, de tourner à droite, à gauche ou de continuer sur leur voie.

D'autres modèles à dépendance géographique ont cherché à transposer les contraintes observées dans un contexte de communications d'urgence, suite à une catastrophe. C'est notamment le cas du *modèle de mobilité en situation de post-désastre* [35], qui cherche à représenter d'une part une mobilité réaliste de nœuds ici appelés agents mobiles, et d'autre part l'impact du désastre considéré sur le déplacement de ces agents. En termes de topologie, ce modèle est proche des modèles Manhattan et Pathway en ce qui concerne la représentation des bâtiments, interconnectés par des voies de circulation. Ici, les types de déplacements dépendent de la nature des agents mobiles : ceux-ci peuvent par exemple représenter des secouristes qui utilisent le réseau de circulation pour se diriger vers un point d'intérêt, des véhicules qui circulent de bâtiment en bâtiment ou encore des policiers parcourant en boucle un parcours prédéfini. L'autre aspect important de ce modèle est la prise en compte de l'impact d'un désastre sur les infrastructures. En effet, le désastre est ici localisé, et selon la distance les séparant de cet épocentre, les extrémités des routes sont dotées d'un coefficient de dégradation c_d :

$$c_d = \begin{cases} 1 & 0 \leq d \leq d_{critique} \\ K \cdot \frac{I}{(d-d_{critique})^2} & d > d_{critique} \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec d la distance séparant l'extrémité de route considérée à l'épicentre du désastre, $d_{critique}$ une distance de seuil en deçà de laquelle la route est systématiquement considérée inutilisable, K un facteur de normalisation et I un paramètre représentant l'intensité du désastre. Au-dessus d'une valeur prédéfinie pour c_d , le tronçon de route auquel appartient l'extrémité est considéré inutilisable, et les agents mobiles ne pourront pas le parcourir. Ce modèle, qui présente des dépendances spatiales et géographiques selon la classification de la Fig. 2.1, permet ainsi de retranscrire de manière relativement fidèle des scénarios de déploiement en situation de post-désastre.

Les modèles déterministes

L'approche générale suivie par ces modèles est celui de la reproduction de trajectoires de nœuds mobiles réellement observées. Il s'agit, dans une majorité de cas, de traces préalablement enregistrées, qui contiennent le déroulé détaillé de la mobilité d'un ou plusieurs nœuds pendant un temps donné. Bien que souvent difficiles à produire et peu flexibles à manipuler, s'il s'agit de diverger du contexte de mobilité dans lequel ces traces ont été enregistrées, ces modèles permettent en revanche d'obtenir un relatif réalisme dans la retranscription du scénario de mobilité étudié. Ces traces sont souvent celles de groupes d'utilisateurs ayant été produites dans le contexte spécifique d'une ville [36], d'un campus universitaire [36, 37, 38], d'une entreprise, etc. Dans la mesure où ces ensembles de données sont peu commodes à obtenir, certains ensembles de données rendus publiquement disponibles ont été particulièrement réutilisés dans diverses études. C'est le cas par exemple de l'ensemble de Dartmouth [38], qui représente environ un an de données de connexions sur les 560 points d'accès WiFi du campus universitaire éponyme. De même, des ensembles de traces relatifs aux déplacements de véhicules ont été produits et étudiés, parmi lesquels celui obtenu au cours de l'étude de Zhu [39], retraçant les motifs de mobilité de plusieurs milliers de taxis de la ville de Shanghai.

2.1.2 Propriété de prévisibilité des mobilités

Au-delà de la classification générale donnée dans la sous-section précédente, il est intéressant de considérer également ces mobilités sous l'angle du caractère prévisible, ou non, des mouvements considérés. Par exemple, il apparaît immédiatement que l'ensemble des modèles purement aléatoires, comme MA, RWP, RD, aboutissent à des motifs de mobilité pour lesquels les déplacements sont totalement imprévisibles, par construction. En revanche, les autres types de modèles, en particulier ceux avec dépendances temporelles, spatiales ou géographiques, peuvent selon les cas exhiber des mobilités prévisibles, ou non. À titre d'exemple, un modèle avec dépendance spatiale comme le modèle de mobilité en poursuite précédemment mentionné, pourrait être utilisé dans des scénarios de déploiement où les trajectoires sont supposées prévisibles, pour peu que la trajectoire du nœud-cible le soit, et que les composantes de mobilité aléatoires ajoutées à la composante de mobilité de groupe soient nulles.

De manière générale, bien que la prévisibilité des déplacements des nœuds ne soit pas une propriété particulièrement désirée dans les réseaux MANET, certaines solutions nécessitent cependant de connaître, par anticipation, les trajectoires à venir. C'est notamment le cas des protocoles MANET géographiques, pour lesquels la connaissance, au minimum, des trajectoires des nœuds est requise pour réaliser un acheminement correct des paquets de données vers leurs destinations respectives.

Les réseaux DTN peuvent également s'appuyer sur la propriété de prévisibilité des trajectoires. C'est le cas par exemple du protocole ASCoT [40], proposé dans le contexte de l'établissement d'une liaison interplanétaire, pour communiquer par exemple avec une sonde spatiale, à travers un ensemble de satellites-relais. Ce protocole utilise la connaissance des trajectoires de ces satellites sur leur orbite pour mettre en œuvre une solution de routage nommée *Positional Link State Routing*, qui permet de construire des routes à sauts multiples en utilisant, par anticipation, des liens de communication qui seront établis à un instant futur. Plus généralement, une classe entière de solutions DTN, s'appuyant sur une entité nommée *oracle* [41, 42, 43], utilise le caractère prévisible des trajectoires des nœuds afin de limiter les effets de surcharge du réseau provoqués par les mécanismes d'inondation que l'on retrouve dans les protocoles de routage DTN de type épidémique, dont on détaillera les principes dans le Chapitre 6. Cette limitation du volume de paquets inondés dans le réseau est en effet permise par l'anticipation des trajectoires des

nœuds, et donc des futurs liens de communication, permettant de déterminer plus précisément à quels nœuds intermédiaires transmettre sélectivement les paquets de données vers une destination, au lieu de les transmettre systématiquement, par inondation, à tous les nœuds rencontrés lors des contacts successifs. Un autre exemple de réseau intermittent où la mobilité des nœuds peut être anticipée et alimenter ainsi des mécanismes de routage prédictifs est le déploiement **DTN** évoqué dans l'étude de Jones [44], qui met en œuvre 36 véhicules du réseau de bus de Seattle. Ces véhicules, dont on connaît précisément les trajets et horaires de passage, sont supposés dotés de liens de communication avec une portée radio prédéfinie, ce qui permet à un mécanisme de routage prédictif d'estimer les contacts à venir, et d'adapter sa stratégie de relais de paquets de données en conséquence.

On notera enfin que les mécanismes de routage **DTN** prédictifs donnés en exemple ne requièrent pas nécessairement une connaissance omnisciente des futures trajectoires de l'ensemble des nœuds du réseau. En effet, ceux-ci sont souvent conçus pour manipuler une probabilité d'acheminer avec succès un paquet de données vers sa destination à travers un nœud voisin [41]. La détermination d'un seuil de probabilité adapté permettant de prendre une décision de routage est ici un aspect essentiel, dont la pertinence peut être généralement vérifiée par l'observation du compromis entre le taux de délivrance des paquets de données, et le surcoût provoqué par la duplication implicite des paquets et leur transmission par plusieurs voisins et ainsi par différents chemins. Cependant, disposer de mobilités prévisibles permet naturellement à ces mécanismes prédictifs de prendre des décisions de routage précises, et en conséquence d'aboutir généralement à une meilleure performance en ce qui concerne le compromis évoqué.

2.1.3 Considérations de distribution spatiale des nœuds d'un réseau

Par définition et quel que soit le modèle de mobilité considéré, la distribution spatiale d'un ensemble de nœuds se déplaçant sur une surface d'exploration donnée varie avec le temps. Or, même pour les modèles de mobilité aléatoire, il est intéressant de s'intéresser aux propriétés asymptotiques de cette distribution, c'est-à-dire en principe mesurées sur un temps tendant vers l'infini, et concrètement, sur un temps d'observation significativement long. Il a en particulier non seulement été montré pour les modèles **MA**, **RWP** et **RD** qu'avec le temps de simulation, cette distribution converge vers une distribution stationnaire, mais que de plus, la distribution stationnaire des modèles **MA** et **RD** est uniforme, tandis que celle de **RWP** ne l'est pas [45, 46]. Cette observation peut être expliquée par le fait que la distribution des directions prises par les nœuds est uniforme par construction pour des mobilités comme **MA** et **RD**. En revanche, avec **RWP**, ce sont les coordonnées vers où les nœuds seront amenés à se déplacer à la prochaine époque qui sont uniformément distribuées : ainsi, un nœud se dirigeant vers une bordure aura une probabilité plus grande de choisir une nouvelle position dans la direction opposée à son mouvement, et donc, une plus grande probabilité de retourner vers le centre de la surface d'exploration.

Selon les scénarios réseau considérés, ces considérations de stationnarité des distributions asymptotiques des nœuds relatives aux modèles de mobilité aléatoire peuvent avoir une importance, ou non. En effet, selon le contexte de déploiement, utiliser un modèle comme **RWP** dont la distribution spatiale des nœuds ne converge pas vers une distribution stationnaire uniforme, peut se transformer en biais d'interprétation si cette propriété n'a pas été prise en compte et que celle-ci a un impact notable sur les résultats de l'étude [46]. En revanche, un tel modèle peut aider à retranscrire plus fidèlement des mouvements observés qui exhibent une propriété similaire. Ainsi, dans la mesure où nous utilisons le modèle **RWP** pour représenter le mouvement de certains des nœuds du réseau

dans la suite de ce manuscrit, nous reviendrons en fin de chapitre sur les raisons qui nous permettent de choisir ce type de mobilité sans risquer de rencontrer le biais d'interprétation évoqué.

2.2 Principes et formes de mobilité contrôlée

2.2.1 Principes généraux

Dans les infrastructures de télécommunications et en particulier dans les réseaux MANET et DTN, la mobilité des nœuds est traditionnellement perçue comme une nuisance intrinsèque et une source de problèmes à même de provoquer de nombreuses perturbations sur les liens de communication. L'approche est généralement d'adapter les protocoles réseau, voire les applications elles-mêmes, de manière à diminuer les impacts négatifs de ces types de mobilité. En revanche, lorsque cette mobilité n'est pas subie, mais peut être au contraire être exploitée de manière à mieux adapter la topologie du réseau aux besoins applicatifs, la manière d'utiliser les principes de mobilité se pose différemment. On la désigne alors sous le nom de *mobilité contrôlée* [47, 48]. Celle-ci est utilisée pour de multiples objectifs applicatifs, au nombre desquels l'extension de la durée de vie globale du réseau [49], la mise en œuvre d'une solution de communication dans un réseau initialement déconnecté [47, 50] ou encore la collecte facilitée des messages issus de capteurs en contrôlant la mobilité des puits de données dans les réseaux de type WSN [48].

À ce sujet, on peut constater que le principe de mobilité contrôlée est ici énoncé de manière éminemment générale, sans hypothèse en particulier sur la manière de le mettre concrètement en œuvre, notamment en termes de localisation de la prise de décision. En conséquence, nous pourrions dans les trois prochaines sous-sections constater la diversité des solutions proposées, tant sous l'angle algorithmique qu'architectural. Dans la mesure où nous sommes particulièrement intéressés par une mise en place du principe de mobilité contrôlée dans un contexte de réseaux sans fil de type MANET ou DTN, nous nous sommes penchés en particulier, du point de vue architectural, sur le caractère centralisé ou distribué des solutions évoquées, ainsi que plus généralement de la faisabilité de leur déploiement concret dans ce contexte réseau.

2.2.2 Mécanismes de planification de trajectoire

Parmi les diverses formes de mobilité contrôlée, les mécanismes de planification de trajectoire s'imposent comme un type d'approche très exploré ces dernières décennies, du moins sous l'angle du déplacement de véhicules. En effet, ces mécanismes ne peuvent pas systématiquement être replacés dans le contexte plus général des problématiques réseau qui nous intéressent dans cette thèse. Quoiqu'il en soit, les algorithmes de planification de trajectoire ont été objets de nombreuses études dans des domaines tels que la robotique [51, 52], le transport autonome [53, 54] et la navigation autonome d'aéronef sans équipage (UAV) [54].

Au nombre de ces mécanismes de planification de trajectoire, on peut distinguer ceux qui s'appliquent à un ensemble de nœuds pour remplir un objectif réseau prédéfini. C'est par exemple le cas de la stratégie de contrôle décentralisée présentée dans l'étude de Dixon [55], qui s'appuie sur l'estimation du gradient d'une fonction-objectif préalablement définie. Le but est ici de former des chaînes de communication et de maximiser la capacité globale du réseau en déplaçant les relais sur la base du rapport signal-sur-bruit (SNR) que ces derniers mesurent. De la même manière, l'étude de Zavlanos [56] examine, au moyen de techniques issues de la théorie des graphes, un problème de connectivité

réseau dans le but de former la topologie souhaitée. Enfin, l'étude de Zema [57] s'intéresse également à un mécanisme de planification de trajectoire avec la définition d'une fonction-objectif similaire, permettant de formuler un problème de connectivité, comme le font les deux études précédentes. Un modèle analytique est ici utilisé pour planifier le mouvement de nœuds mobiles spécifiques, les nœuds de recherche, de manière à ce qu'il puissent entrer efficacement en contact avec les autres nœuds, dits infectés, et ainsi remplir les objectifs applicatifs du scénario considéré.

Par opposition aux mécanismes de planification de trajectoire décentralisés que nous venons de décrire brièvement, les deux prochains types de mobilité contrôlée, reposant sur des principes de *stigmergie* et de *forces virtuelles* que nous détaillerons, ne considèrent pas nécessairement que la connectivité réseau est un besoin qui fait intrinsèquement partie d'un problème à formuler explicitement. À la place, ces classes d'algorithmes s'appuient en premier lieu sur les décisions locales aux nœuds, que ces derniers prennent sur la base de l'observation de leur voisinage et, plus généralement, de leur environnement. Les effets de ces décisions restent simple au niveau local, mais peuvent s'agréger en un comportement global, dit *émergent*. Or, c'est ce comportement émergent qui est à même de répondre aux besoins applicatifs prédéfinis dans les scénarios de déploiement.

2.2.3 Stigmergie et mécanismes bio-inspirés

Le principe de *stigmergie* a été théorisé par Grassé [58] vers la fin des années 1950 durant ses activités de recherche sur les termites. Ces termes se réfèrent à l'aptitude d'un ensemble d'entité mobiles à se coordonner indirectement et adopter globalement un comportement émergent, par le moyen de traces déposées dans l'environnement. Ces entités peuvent être par exemple des insectes sociaux, comme c'était le cas dans le cadre de recherche original de l'étude citée, mais il peut plus généralement s'agir d'un essaim de nœuds mobiles, plus proche du domaine qui nous intéresse ici. Dans ce dernier contexte, les mécanismes mettant en œuvre le principe de stigmergie s'appuient souvent sur la notion de *phéromone virtuelle* [59, 60]. À l'origine, les phéromones sont des substances chimiques émises par de nombreux animaux et déposées dans l'environnement, qui agissent sur le comportement des espèces concernées. En particulier, elle peuvent servir de vecteur à la coopération entre diverses espèces sociales pour la réalisation d'une tâche commune, que l'on peut ainsi qualifier, pour revenir aux termes que nous avons déjà employés, de comportement émergent. De plus, dans le contexte de l'application aux réseaux de communication, les phéromones virtuelles sont caractérisées par quelques propriétés structurantes :

- Quel que soit le mode de réalisation des différentes solutions à base de phéromones virtuelles, celles-ci sont généralement considérées comme des messages de type *broadcast*, donc sans destinataire particulier. En revanche, ces messages sont associés au lieu où ils ont été émis.
- Ces messages possèdent une intensité. Or, deux messages émis au même endroit peuvent être agrégés en un seul, de plus forte intensité. Cette première propriété est désignée sous les termes d'*additivité du signal*. De même, l'intensité d'un message peut diminuer avec le temps. On parle ici de *dégradation du signal*.

Sur cette base, la manipulation de gradients de diffusion de phéromones [59] peut donner des informations importantes, en termes de planification de trajectoires, qu'il s'agisse par exemple de représenter les directions à suivre [60], les obstacles à éviter, les rétrécissements sur les chemins, la poursuite d'une cible applicative [59], etc. Ce type de stratégie distribuée est donc adapté aux essaims de nœuds à déplacement autonome, tels les robots mobiles et les UAV, qui peuvent utiliser les phéromones collectées dans leur

environnement local pour planifier leurs trajectoires individuelles respectives en conséquence.

Une illustration de l'utilisation des phéromones, et plus particulièrement du bénéfice qu'il est possible de tirer de la propriété de dégradation du signal, est donnée dans les résultats de travaux de Kuiper [29]. Cette étude, qui cherche à doter un ensemble d'UAV d'un motif de mobilité permettant l'exploration efficace d'une zone prédéfinie, a déjà été mentionnée dans la Sous-section 2.1.1, où une première solution, reposant sur l'utilisation d'un processus de décision markovien pour diriger les UAV, a été citée et les détails de décision ont été donnés dans la Table 2.1. De toute évidence, si ce modèle de mobilité possède une dépendance temporelle, comme nous l'avons vu, il n'exhibe cependant pas de dépendance spatiale : les nœuds explorent la surface de manière non coopérative. Or, cette même étude propose un second modèle de mobilité s'appuyant cette fois-ci sur les mécanismes de stigmergie. Chaque nœud émet ici des phéromones de nature répulsive, qui se dégradent avec le temps. Les UAV passant dans une zone récemment explorée auront tendance à se diriger là où le moins de phéromones a été détecté dans l'environnement, et se déplaceront donc vers une zone qui a soit été peu explorée, soit qui a été explorée depuis un temps tel que les phéromones associées à cette exploration se sont depuis dégradées. Pour ce second modèle, un processus de décision est également proposé par les auteurs, mais repose cette fois-ci sur une évaluation régulière des phéromones détectées par un nœud sur sa gauche, devant-lui et sur sa droite, comme illustré par la Table 2.2. Au total, on notera que ce modèle présente une dépendance temporelle (puisque les phéromones traduisent une action antérieure), mais aussi spatiale (puisque les nœuds altèrent leur trajectoire sur perception de phéromones issues d'autres nœuds). Le mouvement total de l'ensemble des UAV est donc de ce point de vue coopératif, et donne de meilleurs résultats en termes de couverture totale, en comparaison du mouvement s'appuyant sur un simple processus de décision markovien. En revanche, l'utilisation de phéromones répulsives amène ici des contacts entre nœuds plus intermittents, ce qui peut poser un problème important si cet ensemble de nœuds doit former un réseau de communication, comme nous le souhaitons dans le cadre de cette thèse.

TABLEAU 2.2 – Modélisation du mouvement d'un véhicule aérien au moyen d'un processus de décision utilisant des phéromones virtuelles répulsives [29]. *Gauche*, *Centre* et *Droite* représentent la quantité de phéromones respectivement détectées sur le devant-gauche, à l'avant et sur le devant-droit du nœud considéré. De plus, $Total = Gauche + Centre + Droite$.

Probabilité de l'action		
Virer à gauche	Aller tout droit	Virer à droite
$\frac{Total-Gauche}{2 \cdot Total}$	$\frac{Total-Centre}{2 \cdot Total}$	$\frac{Total-Droite}{2 \cdot Total}$

Au total, le déploiement concret des principes de stigmergie dans le contexte de la navigation distribuée d'un groupe de nœuds est, en règle générale, compliqué par la difficulté de mettre en œuvre les interactions entre les nœuds et leurs environnement. De fait, les solutions reposant sur l'utilisation de phéromones virtuelles sont souvent réduites à soit définir une entité centralisée pour réaliser la supervision de ces interactions [60], soit à laisser les nœuds échanger leurs visions partielles de l'environnement [29], avec le risque que celles-ci deviennent localement incohérentes ou incomplètes, et que ces échanges provoquent un accroissement excessif du trafic réseau.

2.2.4 Mobilité contrôlée par un système de forces virtuelles

Les principes de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles sont parfois qualifiés de *physico-mimétiques* [61] dans la mesure où les forces mentionnées sont souvent définies

par analogie avec des forces physiques. À cet égard, divers travaux ont examiné l'utilisation de forces de différente nature, qu'elles soient d'origine gravitationnelle ou électromagnétique [61, 62], issues des modèles d'expansion de gaz [63] ou de tension superficielle à la surface d'un liquide [64]. Il peut s'agir aussi de forces virtuelles bio-inspirées [65] ou encore de forces définies de manière personnalisée, sans analogie particulière avec des mécanismes physiques ou biologiques [66, 67]. Les mécanismes de mobilité contrôlée s'appuient ici sur les interactions locales entre nœuds, généralement géographiquement proches. Bien que ces interactions puissent être définies différemment selon les solutions, elles partagent cependant des caractéristiques communes :

- En plus des forces traditionnelles (ex. gravité, poussée, portance, frottements, traînée, ...) auxquelles ils sont soumis, les nœuds cherchent à évaluer régulièrement la résultante des forces virtuelles exercées par leurs nœuds voisins, de manière à altérer leur propre accélération, vitesse ou trajectoire en conséquence.
- Afin de permettre un calcul des forces virtuelles exercées par d'autres nœuds voisins, une observation d'informations locale est effectuée, soit par balayage à courte portée du voisinage au moyen de capteurs adaptés, soit par l'échange de messages entre nœuds voisins.

Forces virtuelles avec un objectif de répartition géographique

Un exemple de l'utilisation des forces virtuelles est donné par les travaux de Spears [61]. La solution proposée, qui utilise des forces virtuelles inspirées de forces de gravitation, suppose le déploiement d'un nombre important de nœuds afin de former des topologies en treillis en trois dimensions. Les auteurs observent et estiment un seuil pour l'intensité de ces forces, en dessous duquel les nœuds se répartissent sans doubler à la même position. En revanche, au-dessus de ce seuil, plusieurs nœuds peuvent coexister dans la même zone, du fait de minima locaux d'énergie potentielle, toujours dans un esprit d'analogie avec une force gravitationnelle. Cette colocalisation de plusieurs nœuds très rapprochés dans une même zone est exploitée par les auteurs comme argument de tolérance au panne des nœuds et de mécanisme d'auto-réparation. Cela étant, cette propriété peut dans un contexte plus général s'avérer délétère pour le bon fonctionnement du réseau : cette topologie, outre le fait qu'elle requiert le déploiement d'un grand nombre de nœuds, peut en effet provoquer de fréquentes collisions entre ces derniers.

D'une manière similaire, Cheng [63] propose une étude examinant essentiellement la formation de motifs géométriques prédéfinis, en s'intéressant à la manière dont communiquent les nœuds pour réaliser la topologie désirée, mais sans que cette dernière ait une finalité de déploiement de réseau. Les auteurs proposent ici une solution distribuée adaptée à un essaim de nœuds mobiles qui, par mécanismes itératifs de perception de leur entourage, de trilatération ainsi que de communication de ces informations au voisinage local, parviennent à établir un système commun de coordonnées, se situer dans ce système et former une figure pré-établie. Pour cette dernière étape, une mobilité contrôlée à base de forces virtuelles de type modèle d'expansion des gaz est appliquée.

Elkaim [64] s'est quant à lui intéressé à l'utilisation des forces virtuelles afin de mettre en œuvre une mobilité de groupe, en s'appuyant sur la notion de nœud *leader* virtuel, dont la trajectoire est planifiée, et qui contrôle la mobilité de l'ensemble des nœuds de l'essaim ainsi constitué. Les forces virtuelles sont ici inspirées de mécanismes de tension superficielle à la surface d'un liquide et d'analogies avec la tension d'un ressort parfait. Dans ce contexte, le système de forces proposé permet d'éviter les phénomènes d'oscillations de trajectoires, courantes dans les mécanismes d'analogies avec des ressorts ou plus généralement des forces d'attraction-répulsion. De plus, les obstacles sont ici modélisés : on suppose que ces derniers sont contenus dans un polygone convexe, qui exerce

une force de répulsion adéquate sur les nœuds mobiles à proximité. Au total, cette méthodologie s'appuie sur des mécanismes simples et relativement adaptés à un nombre réduit de nœuds mobiles. En revanche, elle n'explique pas comment répondre concrètement aux besoins en dissémination des informations, en particulier sur le leader virtuel, lorsque les nœuds sont dotés d'interfaces de communication sans fil à portée radio intrinsèquement limitée, comme c'est le cas dans la grande majorité des déploiements de réseaux MANET.

Forces virtuelles avec un objectif de communication entre nœuds

L'étude de Yanmaz [66] s'applique à examiner, pour un groupe d'UAV parcourant une surface d'exploration donnée, le compromis entre la couverture globale offerte par la disposition des nœuds et la connectivité réseau que cette topologie pourrait offrir. Les forces virtuelles discutées ici sont de nature répulsive tandis que l'approche proposée est distribuée et s'appuie sur un mécanisme d'échange des informations de positions, directions et vitesses entre nœuds. Il s'agit de plus d'une mobilité prédictive, les UAV cherchant à estimer les temps futurs de rupture de liens avec leurs voisins, sur la base de l'échange des informations mentionnées. Comme on peut s'y attendre, utiliser un modèle de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles répulsives permet d'améliorer la couverture globale formée par l'ensemble des nœuds du groupe, mais au détriment de la connectivité réseau, ce qui peut poser de sérieux problèmes applicatifs si le nombre de nœuds déployés est insuffisant en regard de la surface d'exploration considérée.

Les travaux de Khoufi [68] s'appliquent également à utiliser des mécanismes de forces virtuelles dans une solution conçue pour déployer dynamiquement, et de manière distribuée, les nœuds mobiles d'un WSN sur des surfaces pouvant contenir des obstacles. L'objectif est ici de déployer les nœuds rapidement, en offrant la meilleure couverture possible tout en maintenant la connectivité entre nœuds voisins. De plus, l'algorithme proposé ici, OA-DVFA, vise à minimiser les déplacements des nœuds, pour des considérations de conservation énergétique, et permet de tirer parti de la capacité de ces derniers, lorsqu'ils sont redondants, à rentrer dans un état de veille. Cette solution, qui prend en compte les possibles problèmes d'oscillation provoqués par l'utilisation de forces virtuelles attractives et répulsives, est jugée en conséquence adaptée au déploiement concret de larges ensembles de capteurs mobiles d'un WSN sur une zone à la topographie a priori inconnue.

En définitive, il est nécessaire de rappeler que la plupart des mécanismes évoqués de mobilité contrôlée par un système de phéromones ou de forces virtuelles supposent généralement le déploiement d'un nombre important de nœuds. Les solutions s'appuyant sur les forces virtuelles sont en outre typiquement adaptés à la formation de topologies en grilles ou en treillis, tandis que celles utilisant des mécanismes de stigmergie peuvent être compliquées à déployer concrètement dans un contexte de mise en œuvre distribuée. En outre, les scénarios particuliers que nous examinons dans les chapitres suivants imposent de considérer la perspective d'un nombre de nœuds limité devant être utilisés de la manière la plus efficace possible. Ainsi, dans les prochains chapitres, nous nous concentrerons sur la conception de stratégies de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles capables de répondre aux contraintes imposées par ces scénarios. Nous chercherons à déployer ces stratégies sur les nœuds devant jouer un rôle de relais pour le routage MANET des paquets de données.

Pour les autres nœuds, en particulier ceux jouant un rôle d'observation de la surface d'exploration, nous n'aurons dans la plupart des cas pas l'usage de motifs de mobilité contrôlée, et nous utiliserons, dans la plupart des cas, une simple mobilité aléatoire de type RWP. À ce sujet, nous avons évoqué dans la Sous-section 2.1.3 que le caractère non

uniforme de la distribution asymptotique des nœuds dans un modèle aléatoire de type **RWP** peut avoir un impact sur les résultats de performance obtenus, et doit au moins être pris en considération préalablement à l'analyse des résultats. En ce qui concerne les scénarios que nous détaillerons dans les chapitres 4-6, ceux-ci font tous l'hypothèse réaliste que les nœuds sont initialement non uniformément distribués, puisque déployés depuis la même position initiale. En conséquence, les scénarios réseau envisagés s'accommodent bien d'une distribution spatiale non uniforme des nœuds d'exploration dotés d'une mobilité **RWP**.

Il faut noter que nous ferons une exception en étudiant, dans le paragraphe 6.2.5, la conception d'une mobilité contrôlée pour les nœuds d'exploration. Dans ce cas précis, nous nous appuyerons sur l'utilisation de forces virtuelles répulsives, pour étudier les possibles gains en couverture, dans une approche similaire à celle suivie dans l'étude de Yanmaz [66] précédemment mentionnée. Nous nous référerons à cette occasion aux résultats obtenus sur cette étude en termes de compromis entre couverture et connectivité. Cependant, dans cette partie, nous porterons un regard différent sur la notion de connectivité, puisque nous verrons que dans nos scénarios, la mission d'exploration des nœuds concernés n'impose à ces derniers que d'échanger quelques messages de contrôle lors de leur contact initial. Nous constaterons aussi que ces messages sont également utilisés par les nœuds pour estimer les forces virtuelles exercées par les nœuds voisins. En d'autres termes, dans notre étude, si les nœuds se repoussent, c'est qu'ils se sont préalablement échangés les messages mentionnés ; le besoin exprimé en termes de connectivité est de fait satisfait.

Chapitre 3

Conception du protocole VFP

Sommaire

3.1 Définition d'un système de forces virtuelles	25
3.1.1 Forces d'attraction-répulsion	25
3.1.2 Force de frottement	27
3.1.3 Force d'alignement	28
3.1.4 Principes d'utilisation des forces virtuelles	32
Application des forces virtuelles dans un contexte de topologie chaînée . . .	32
Modèle dynamique d'un nœud soumis aux forces virtuelles	33
3.2 Conception de la solution protocolaire VFP	33
3.2.1 Objet du message Balise	33
3.2.2 Description du message Balise simple	33
3.2.3 Description du message Balise étendu	34
3.2.4 Formation et maintenance d'une chaîne VFP	37
Élection et insertion d'un nouveau nœud intermédiaire	37
Suppression d'un nœud intermédiaire	40
Autres aspects de maintenance de la chaîne	41
3.2.5 Variantes VFPs, VFPe et VFPC du protocole VFP	42

3.1 Définition d'un système de forces virtuelles

Le fonctionnement des stratégies de mobilité contrôlée présentées et étudiées dans la suite de ce document repose sur notre propre conception d'un système de forces virtuelles, qui permet de contrôler les trajectoires des nœuds sous influence de ces forces. Grâce à ces mécanismes, ces nœuds peuvent être déplacés dans le réseau, de manière à pouvoir former des chaînes de communication sans fil à sauts multiples, qui seront établies puis maintenues entre les sources et destinations de flots de trafic utilisateur. Dans la suite de cette section, nous précisons les principes qui sous-tendent les composantes du système que nous proposons. Celui-ci comprend des forces virtuelles d'attraction, de répulsion, de frottement et d'alignement. Nous abordons ensuite les considérations d'utilisation concrète de ces forces, en particulier à travers l'utilisation d'une solution protocolaire que nous avons conçue à cet usage, et que nous détaillons en deuxième partie de chapitre. Ces solutions seront à la base de tous les scénarios réseaux que nous proposerons dans les chapitres suivants.

3.1.1 Forces d'attraction-répulsion

La première composante de notre système de forces consiste en l'application, dans la proximité d'un premier nœud du réseau, de deux forces d'attraction et de répulsion, exercées sur un second nœud situé dans cette zone de voisinage. Comme l'illustre la Fig. 3.1, des zones d'attraction et de répulsion sont définies autour de tout nœud N mettant en œuvre les mécanismes considérés : un disque centré sur N est défini comme la zone de répulsion, tandis qu'une couronne également centrée sur N représente la zone d'attraction. On notera que pour des considérations de lisibilité, cette figure n'affiche

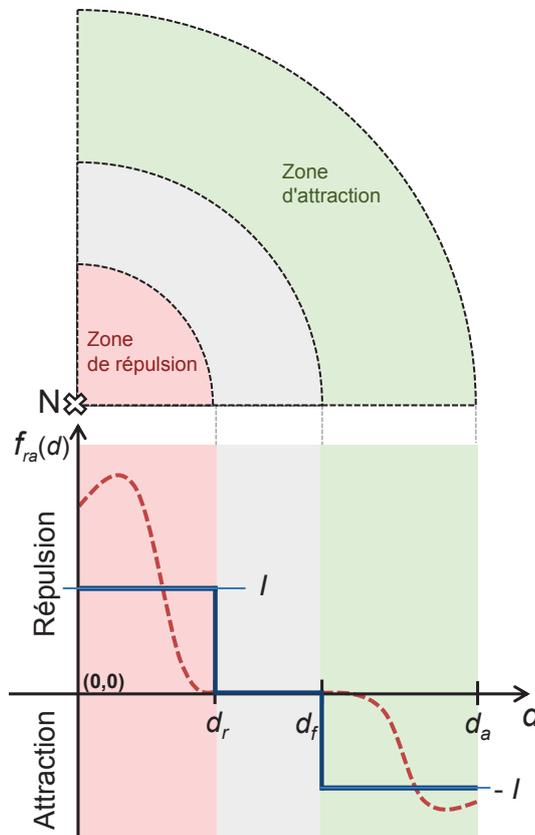


FIGURE 3.1 – Illustration des forces virtuelles d'attraction-répulsion exercées par un nœud réseau N dans son entourage.

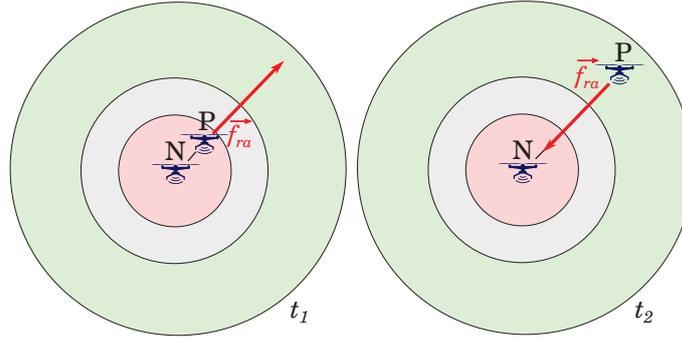


FIGURE 3.2 – Illustration de l'orientation des forces virtuelles d'attraction-répulsion \vec{f}_{ra} exercées par un nœud réseau N sur un voisin P, selon la position de ce dernier aux temps t_1 (gauche) et t_2 (droite).

qu'un secteur circulaire (respectivement annulaire) illustré en rouge pour la zone de répulsion (respectivement illustré en vert pour la zone d'attraction).

Ces forces sont définies de manière à ce que tout nœud P situé dans la zone de répulsion de N (respectivement dans sa zone d'attraction) est soumis à une force répulsive (respectivement attractive) colinéaire avec \vec{NP} , et dont l'intensité ne dépend que de la distance $d = \|\vec{NP}\|$. Différents profils de forces peuvent être définis, comme par exemple illustré dans la partie basse de la Fig. 3.1 par la courbe quelconque d'intensité de force tracée en pointillés rouge. Cependant, dans la suite de ce document, et dans le but de simplifier la mise en œuvre de ces forces ainsi que l'interprétation de leur incidence sur le comportement du protocole de mobilité contrôlée les utilisant, on prendra comme profil de force la fonction étagée tracée en bleu dans la même figure. Cette fonction $f : [0, d_a] \rightarrow \{-I, 0, I\}$ est telle que :

$$f_{ra}(d) = \begin{cases} I & 0 \leq d \leq d_r \\ 0 & d_r < d < d_f \\ -I & d_f \leq d \leq d_a \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec d_r , le rayon du disque définissant la zone de répulsion de N, tandis que d_f et d_a représentent respectivement les rayons intérieur et extérieur de la couronne définissant la zone d'attraction de N. Enfin, $I \in \mathbb{R}_+$ est un paramètre que nous appelons dans la suite de ce manuscrit l'*intensité des forces d'attraction-répulsion*, et dont nous étudierons par la suite l'impact sur la performance globale d'un réseau composé de nœuds mettant en œuvre ces forces, dans la Sous-section 4.3.3.

En conséquence, selon qu'un nœud P est soumis à la répulsion (respectivement l'attraction) d'un nœud voisin N, comme illustré dans la Fig. 3.2, une force virtuelle $\vec{f}_{ra} = I \cdot \frac{\vec{NP}}{\|\vec{NP}\|}$ (respectivement $\vec{f}_{ra} = -I \cdot \frac{\vec{NP}}{\|\vec{NP}\|}$) est rajoutée dans le système de forces virtuelles. Le principal intérêt de cette composante d'attraction-répulsion est donc de permettre à deux nœuds (ou plus) de maintenir entre eux un intervalle de distance qui dépendra des distances d_r , d_f et d_a . Quant à I , sa valeur a naturellement une incidence sur l'accélération du nœud sur lequel les forces d'attraction-répulsion sont exercées, comme nous le verrons dans la Sous-section 3.1.4. Ainsi, la composante d'attraction-répulsion est conçue pour amener les nœuds sous l'effet de cette composante à maintenir leurs distances plus ou moins abruptement, selon la valorisation de I .

À ce stade, il faut cependant souligner que si la composante d'attraction-répulsion permet de spécifier des objectifs de distance entre nœuds liés par les effets de cette force, celle-ci ne permet pas seule d'assurer qu'un nœud se déplaçant sous son effet puisse se stabiliser entre la zone de répulsion et la zone d'attraction du nœud à l'origine de cette force. Par exemple, en reprenant l'exemple de la Fig. 3.2, en ne considérant que les forces

d'attraction-répulsion dans notre système de forces virtuelles, le nœud P sous l'influence de N oscillerait indéfiniment entre la zone de répulsion et la zone d'attraction de N, sans pouvoir s'arrêter sur une position ou dans une zone stationnaire. Il manque donc une composante permettant de stabiliser les nœuds sous l'effet de ce système de forces virtuelles, que nous allons définir par analogie avec une force de frottement, et que nous allons décrire dans la sous-section suivante.

3.1.2 Force de frottement

Comme nous venons de le voir, la force virtuelle de frottement est construite de manière à assurer simplement la stabilisation d'un nœud sous son effet. Elle est définie lorsqu'un nœud de vitesse non nulle se trouve dans la zone de frottement du nœud appliquant le système de forces virtuelles. La zone de frottement d'un nœud, elle, est définie par la couronne centrée sur ce nœud, de rayon intérieur égal au rayon de sa zone de répulsion et de rayon extérieur égal au rayon intérieur de sa zone d'attraction. Par analogie avec un frottement physique, cette composante virtuelle a été conçue de manière à s'opposer au mouvement d'un nœud situé dans la zone de frottement d'un nœud voisin. La Fig. 3.3 donne l'exemple d'un nœud P doté d'une vitesse non nulle \vec{v} et se situant dans la zone de frottement (illustrée par la surface grisée) du nœud N. La composante de frottement \vec{f}_{fr} , colinéaire avec \vec{v} , possède une intensité :

$$f_{fr} = -Cx \cdot f_U \quad (3.2)$$

Avec f_U , arbitrairement fixé à $f_U = 1\text{N} = 1 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}$ et $Cx \in \mathbb{R}_+$, un paramètre déterminant l'intensité de f_{fr} que l'on appelle, par analogie avec une force physique de frottement, le *coefficient de frottement*.

On notera que la conception par analogie avec des forces physique n'impose pas de choisir une modélisation de ces composantes virtuelles au plus près de l'environnement physique dans lequel les nœuds seront déployés. C'est pourquoi f_{fr} telle que définie par (3.2) est construite par analogie avec un objet glissant sur une surface (définissant ainsi un simple frottement cinétique) plutôt qu'avec un objet se déplaçant dans un fluide tel que l'atmosphère (définissant ainsi un frottement aérodynamique, inutilement complexe à mettre en œuvre dans le cadre de ce système de forces virtuelles).

En définitive, cette composante tend à freiner un nœud se trouvant dans la zone de frottement d'un nœud voisin, plus ou moins fortement selon la valeur du coefficient de frottement. À ce sujet, nous analyserons dans la Sous-section 4.3.4 l'impact de la valorisation de Cx sur la performance globale d'un réseau constitué de nœuds mettant en œuvre

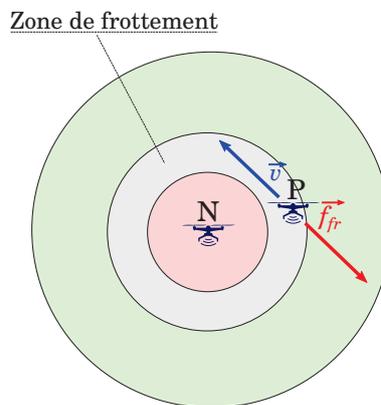


FIGURE 3.3 – Illustration de l'orientation des forces virtuelles de frottement \vec{f}_{fr} exercées sur un nœud P de vitesse \vec{v} situé dans la zone de frottement de N.

le système de forces virtuelles considéré.

3.1.3 Force d'alignement

La dernière composante de notre système de forces virtuelles peut être utilisée pour provoquer la formation de chaînes de communication sans fil à sauts multiples, dans le contexte spécifique où ces chaînes sont formées dans le but de permettre l'échange de données utilisateur entre une paire (S, D) de nœuds du réseau. En effet, les composantes virtuelles discutées jusqu' alors sont définies pour être exercées localement, en supposant qu'un nœud appliquant ces forces et celui sous l'effet de ces forces sont situés en proximité directe. De ce point de vue, on peut donc considérer les forces d'attraction-répulsion et de frottement comme des *forces locales d'interaction* entre nœuds voisins constituant les chaînes de communication considérées. Dans ce contexte :

- Si les deux nœuds S et D font initialement partie de la chaîne en formation et que tous les nœuds de cette chaîne sont initialement alignés et possèdent de plus des trajectoires telles cet alignement puisse perdurer pendant toute la durée du déploiement (ce qui est un ensemble d'hypothèses simplificatrices considéré dans l'étude du Chapitre 4, dans la mesure où le scénario applicatif se prête à ces suppositions) alors la simple mise en œuvre des forces locales d'interaction peut suffire à l'obtention de la topologie chaînée désirée, et l'utilisation d'une force d'alignement telle que décrite dans la suite de cette sous-section est sans objet.

- En revanche, si au moins l'un des deux nœuds d'extrémité de chaîne S ou D ne fait pas partie de la chaîne de communication, ou si les trajectoires des nœuds de la chaîne sont telles que celle-ci ne peut être alignée ou ne peut continuer à être alignée, alors le système de forces virtuelles jusqu'à présent décrit ne peut suffire à aligner la chaîne ou à l'orienter en direction de (ou des) extrémités S ou D manquantes dans la chaîne. La Fig. 3.4 illustre dans sa partie gauche un cas où deux nœuds-relais, N et P, forment une chaîne de communication depuis S, sans pouvoir s'orienter vers le nœud D. Il n'existe en effet pas pour les forces locales d'interaction d'effet amenant les nœuds-relais à réduire à 0 les angles \widehat{NSD} et \widehat{PSD} , c'est-à-dire à s'aligner sur l'axe (SD) formé par les nœuds de trafic S et D. Pour réaliser ce mouvement, comme illustré dans la partie droite de la Fig. 3.4, il est ainsi nécessaire de définir une composante supplémentaire, nommée *force d'alignement*, dans le système de forces virtuelles.

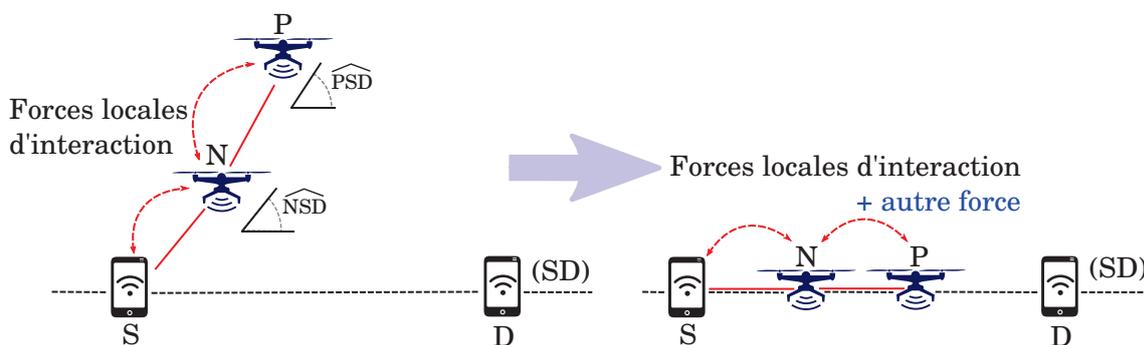


FIGURE 3.4 – Illustration de l'impossibilité d'orienter correctement une chaîne de communication vers son nœud de destination sur la base des forces locales d'interaction seules (gauche) et du besoin de disposer en conséquence d'une composante de force supplémentaire pour réaliser ce mouvement (droite).

La spécificité de cette force est qu'elle ne s'appuie pas sur des interactions nécessairement locales, mais qui dépendent de la distance des nœuds-relais à l'axe (SD) : les positions des nœuds S et D, qui peuvent être situés au-delà du voisinage des nœuds-relais, interviennent donc dans le calcul de cette force. La Fig. 3.5 reprend le cas d'exemple de

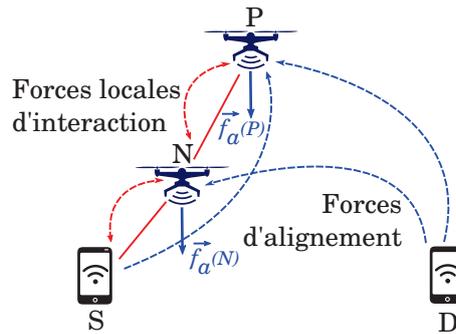


FIGURE 3.5 – Représentation en pointillés bleus de la dissémination d'informations issues des nœuds S et D pour la mesure des forces d'alignement $\vec{f}_a(N)$ et $\vec{f}_a(P)$ appliquées sur les nœuds intermédiaires N et P.

la figure précédente, en représentant au moyen de flèches pointillées en bleu les informations issues des nœuds S et D qu'il est nécessaire de transmettre aux nœuds-relais N et P afin de permettre le calcul des forces d'alignement $\vec{f}_a(N)$ et $\vec{f}_a(P)$ qui seront respectivement appliquées sur les nœuds N et P afin que ces derniers se rapprochent de l'axe (SD).

Contrairement à ce qui a été observé pour les composantes précédentes de notre système de forces virtuelles, les forces d'alignement ne sont pas directement exercées par des nœuds du réseau, mais par des nœuds virtuels situés sur l'axe (SD) : la Fig. 3.6 donne des précisions supplémentaires sur les positions ces nœuds virtuels. Dans ce contexte, le calcul de ces forces nécessite que chaque nœud-relais ait connaissance des coordonnées des nœuds de trafic S et D, ainsi que de sa position logique dans la chaîne et de celle de son prédécesseur (c'est-à-dire de la position du nœud-relais en amont vers le nœud S, ou du nœud S lui-même si le nœud-relais considéré est le nœud intermédiaire logiquement situé juste après le nœud S dans la chaîne). Deux cas se présentent pour ce calcul, et requièrent la détermination des points N_p et P_p , qui sont les projections orthogonales de N et P sur l'axe (SD) :

- Lorsque les distances DP_p et DN_p sont telles que $DP_p < DN_p$, comme montré dans la Fig. 3.6 (gauche), on estime que les positions relatives des points N_p et P_p sur l'axe (SD) sont cohérentes avec leurs positions logiques dans la chaîne de communication. Dans ce cas, on considère que des nœuds virtuels placés respectivement aux positions de N_p et P_p exercent une force d'alignement sur N et P.

- Lorsqu'au contraire $DP_p > DN_p$, comme illustré par la Fig. 3.6 (droite), on estime qu'attirer le point P vers sa projection P_p (et donc vers un point situé plus près du nœud source S que le projeté N_p de son prédécesseur N dans la chaîne) provoquerait une inco-

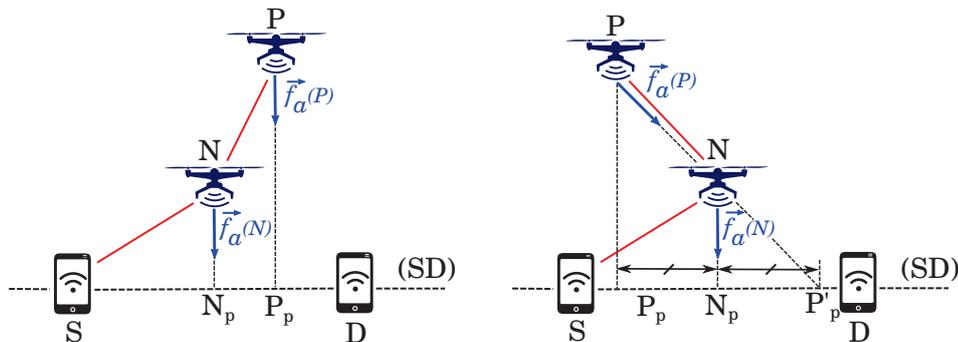


FIGURE 3.6 – Détail de la construction des forces d'alignement sur deux nœuds-relais N et P d'une chaîne [S,N,P] en formation. Considérant les projections N_p et P_p de N et P sur (SD), on représente l'orientation des forces d'alignement selon que $DP_p < DN_p$ (gauche) ou $DP_p > DN_p$ (droite).

hérence sur les positions logiques de N et P dans la chaîne de communication, et aboutirait à la formation d'une topologie réseau non souhaitée, avec des chaînes désordonnées. Dans ce cas, on détermine la position de P'_p , le symétrique de P_p par rapport à N_p sur (SD), et on considère cette fois-ci que la force d'alignement sur P est exercée par un nœud situé non plus en P_p mais en P'_p . La détermination du point d'origine de la force d'alignement exercée sur N reste inchangée.

On notera de plus que la Fig. 3.6 (droite) semble représenter un cas où le nœud P est susceptible, à cause du mouvement induit par la force d'alignement, d'adopter une trajectoire pouvant amener une collision avec le nœud N. En réalité, outre le fait que dans cet exemple le nœud N est lui aussi sujet à des forces d'alignement qui tendront à le diriger dans le même temps vers l'axe (SD) de la manière précédemment décrite, il faut surtout remarquer que cette force n'est qu'une composante parmi d'autres du système total de forces virtuelles, qui comprend par ailleurs une force de répulsion lorsque des nœuds-relais voisins tendent à se rapprocher exagérément. En conséquence, le nœud P aura tendance dans cet exemple à se diriger vers la position P'_p tout en contournant le nœud N, grâce aux effets combinés des forces d'alignement d'une part, et des forces d'attraction-frottement-répulsion exercées par N sur P d'autre part.

De plus, cet exemple illustré par la Fig. 3.6 (droite) nous permet d'aborder et discuter les situations dans lesquelles le système de forces virtuelles pourrait *a priori* se trouver à l'équilibre sans que les nœuds aient atteint les positions désirées. Nous allons voir que les situations de *projections superposées*, et d'*alignements non ordonnés*, que nous allons expliquer, correspondent à des systèmes de forces en équilibre instable et par conséquent à des étapes transitoires vers la réalisation, par ces mêmes nœuds, de la topologie souhaitée.

Cas transitoire des projections superposées La Fig. 3.7 illustre deux cas pour lesquels les projections N_p et P_p des deux nœuds-relais voisins N et P se superposent sur l'axe (SD), et invitent à s'interroger sur l'état du système de forces virtuelles appliquées sur P :

- Dans le cas de gauche, les forces de répulsion et d'alignement appliquées sur P s'opposent. La résultante de ces forces sera orientée sur l'axe (N_pP) , il n'existe donc *a priori* pas de composante de cette résultante selon l'axe (SD), permettant d'éloigner P_p de la position N_p . En pratique, on choisira $\|\vec{f}_a(P)\|$ tel que $\|\vec{f}_a(P)\| < \|\vec{f}_{ra}\|$ de manière à éviter que P adopte une trajectoire pouvant amener une collision avec N, comme précédemment évoqué. En conséquence, P tendra à se positionner autour de la frontière entre les zones de répulsion et de frottement de N. Dans cette situation, tout léger changement de position de N ou P tel que $SP_p < SN_p$ induira une

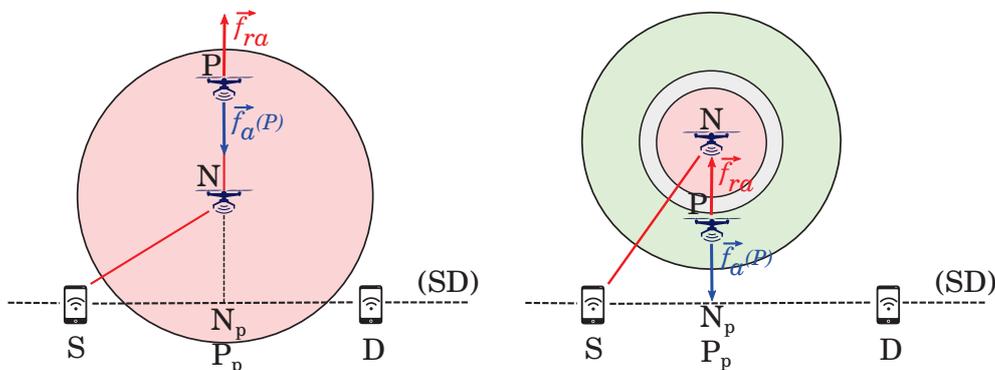


FIGURE 3.7 – Illustration de deux situations transitoires d'équilibre instable pour un nœud-relais P dans une chaîne de communication [S,N,P], pour lesquelles les projections orthogonales de P et son prédécesseur N sur l'axe formé par les nœuds source et destination (SD) sont confondues.

force d'alignement $\vec{f}_a(P)$ dirigée vers P'_p tel que calculé précédemment. En conséquence, P aura tendance à revenir vers D, en adoptant une trajectoire telle que P_p revient se confondre avec N_p . En revanche, en cas de léger changement de position de N ou P tel que $SP_p > SN_p$, P aura tendance cette fois à suivre une trajectoire autour de la frontière entre les zones de répulsion et de frottement de N, l'amenant à la fois plus près de sa projection P_p sur (SD), mais aussi plus près du nœud D. Au total, pour ce cas illustré par la Fig. 3.7 (gauche), P est en situation d'équilibre instable, et sa position d'équilibre stable correspond à une position de P sur l'axe (SD), située dans la zone de frottement de N, et plus proche de D que ne l'est N_p . On notera que pour le cas illustré par cette figure, N est aussi en situation transitoire, et tendra à se diriger également vers l'axe (SD) suivant une trajectoire contrainte par les forces virtuelles exercées par son propre prédécesseur dans la chaîne de communication [S,N,P], c'est-à-dire le nœud source S lui-même. Une fois N et P tous deux arrivés à un point d'équilibre stable sur (SD), P sera dans ce cas plus proche de D que N, de manière cohérente avec les positions relatives de N et P dans la chaîne [S,N,P].

- Dans le cas illustré par la Fig. 3.7 (droite), on retrouve le nœud P dans une situation d'équilibre instable similaire au cas précédent, à la différence près que P aura cette fois-ci tendance à se diriger vers un point d'équilibre stable situé sur l'axe (SD) et dans la zone de frottement de N, en suivant une trajectoire autour de la frontière entre les zones d'attraction et de frottement de ce dernier. Ce point sera également plus proche de D que ne l'est N_p . On notera que pour ce cas, N est également lui-même en situation transitoire et se dirigera également vers l'axe (SD) en suivant une trajectoire contrainte par son prédécesseur D dans la chaîne de communication. Ainsi, une fois N et P tous deux arrivés à un point d'équilibre stable sur (SD), P sera donc dans ce cas aussi plus proche de D que N, de manière cohérente avec les positions relatives de N et P dans la chaîne [S,N,P].

Cas transitoire des alignements non ordonnés Un nœud-relais se trouvant sur l'axe (SD) passant par les nœuds source et destination de la chaîne à laquelle il appartient peut pourtant se trouver sous l'effet d'un équilibre instable, si sa position physique sur (SD) n'est pas cohérente avec sa position logique dans la chaîne considérée. La Fig. 3.8 montre ainsi l'exemple d'une chaîne de communication [S,N,P] en cours de formation vers un nœud destination D, avec en particulier un nœud-relais P se trouvant plus éloigné de D que son prédécesseur N sur (SD). Dans cette configuration, la force d'alignement exercée sur P est dirigée vers P'_p comme expliqué précédemment, et au vu du système de forces virtuelles considéré, P aura tendance à osciller sur (SD) autour de la frontière entre les zones de répulsion et de frottement de N. Mais toute légère perturbation sur les positions relatives de N et P telles que les forces \vec{f}_{ra} et \vec{f}_a ne seraient plus colinéaires, induira un

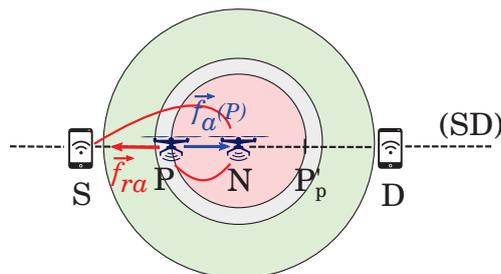


FIGURE 3.8 – Illustration d'une situation transitoire d'équilibre instable pour un nœud-relais P dans une chaîne de communication [S,N,P] alignée sur l'axe (SD) formé par les nœuds source S et destination D, mais non ordonnée.

déplacement de P autour la frontière considérée, selon un mouvement horaire ou anti-horaire de P autour de N, selon la nature de la perturbation. En suivant cette trajectoire, P'_p se rapprochera progressivement de N, ou plus généralement de N_p , si contrairement à l'exemple de la La Fig. 3.8, N n'est pas encore aligné sur (SD). P va donc se déplacer autour de N jusqu'à ce que sa projection P'_p soit confondue avec celle de N. Dans ce cas, N et P se retrouvent dans une nouvelle situation transitoire d'équilibre instable dans le contexte de projections superposées, comme décrit dans le paragraphe précédent. P tendra donc finalement à se rapprocher d'une situation d'équilibre stable en continuant à se déplacer autour de N jusqu'à atteindre l'axe (SD), où sa position géographique sur cet axe sera finalement cohérent avec sa position logique dans la chaîne [S,N,P].

Au total, la force d'alignement ainsi définie est une force virtuelle permettant d'aligner les nœuds-relais d'une chaîne de communication sur l'axe passant par les nœuds source et destination de cette chaîne. Elle permet également de réordonner les chaînes pour lesquelles les éloignements respectifs des nœuds-relais à la destination ne correspondent pas à leurs positions logiques dans celles-ci. Cette force d'alignement est similaire à la force virtuelle d'attraction, à ceci près que la source d'attraction varie selon les positions relatives du nœud considéré et de son prédécesseur dans la chaîne. Dans le cadre de ce document, elle est simplement définie par la relation :

$$\vec{f}_a = Ca \cdot \vec{e} \quad (3.3)$$

Avec $0 < Ca < I$, le coefficient d'alignement borné par I tel que défini dans (3.3), et, en reprenant les notations des exemples précédents, \vec{e} un vecteur unitaire orienté vers la projection orthogonale P_p du nœud P sur l'axe (SD) passant par les nœuds source S et destination D si P_p est plus proche de D que la projection N_p du prédécesseur N de P sur (SD). Dans le cas contraire, \vec{e} est orienté vers P'_p , le symétrique de P_p par rapport à N_p sur (SD).

3.1.4 Principes d'utilisation des forces virtuelles

Application des forces virtuelles dans un contexte de topologie chaînée

Comme précédemment souligné dans la Sous-section 3.1.3, les forces d'alignement ont été définies pour être appliquées dans le contexte du déploiement de chaînes de communication, c'est-à-dire d'un ensemble de nœuds exerçant des forces virtuelles de manière à ce que les nœuds d'une telle chaîne se positionnent là où ils sont utiles pour former une route de communication à sauts multiples entre une source S et une destination D. De manière plus générale, il faut souligner que dans le cadre des études présentées dans la suite de ce document de thèse, le système de forces virtuelles considéré n'est pas appliqué de manière indifférenciée sur la totalité des nœuds du réseau, mais sélectivement sur un sous-ensemble des nœuds de la chaîne. Ce système de forces a déjà été illustré, en particulier au moyen de la Fig. 3.5 où l'on représente les forces locales d'interaction. On précise ici quels nœuds exercent ces forces et quels nœuds sont sous leur influence :

- Les nœuds source S et destination D ne sont pas soumis à des forces virtuelles. S exerce en outre des forces locales d'interaction (i.e. des forces virtuelles d'attraction-répulsion et de frottement) sur son successeur dans la chaîne, si applicable. D n'exerce au contraire aucune force locale d'interaction. Cependant, S et D interviennent tous deux dans l'application des forces d'alignement sur les nœuds-relais.
- Tout nœud-relais est l'objet de forces locales d'interaction exercées par son prédécesseur dans la chaîne, et il exerce lui-même ce type de force sur son successeur dans la chaîne, si applicable. De plus, chaque nœud-relais de la chaîne est soumis à des forces d'alignement.

Modèle dynamique d'un nœud soumis aux forces virtuelles

Le système de forces virtuelles peut être considéré comme complémentaire aux forces physiques appliquées sur un nœud, comme par exemple les forces de gravité, de poussée, de traînée, etc. De ce point de vue, les forces virtuelles pourraient être prises en compte directement dans la boucle **du contrôleur à action proportionnelle, intégrale et dérivée (PID)** de l'auto-pilote s'occupant en particulier du contrôle d'attitude et de trajectoire des nœuds, quelle que soit la nature de ces derniers (ex. robots mobiles, véhicules autonomes, nœuds aériens de type **UAV**, etc.). Dans le cadre des travaux d'évaluation de cette thèse, notre approche a été de considérer un modèle de forces virtuelles simplifié, permettant d'aboutir facilement à la détermination, sur cette base, de valeurs de consignes à fournir à la boucle **PID** de l'auto-pilote. Nous considérons ainsi la relation suivante :

$$\vec{v}(t) = \vec{v}(t_0) + (t - t_0) \cdot \frac{\vec{f}_{ra} + \vec{f}_{fr} + \vec{f}_a}{m} \quad (3.4)$$

Avec $\vec{v}(t)$ la vitesse du nœud à estimer à l'instant t , \vec{f}_{ra} , \vec{f}_{fr} et \vec{f}_a les valeurs déterminées pour les forces virtuelles d'attraction-répulsion, de frottement et d'alignement appliquées sur le nœud considéré à l'instant t , m sa masse et $\vec{v}(t_0)$ sa vitesse à un instant précédent t_0 , tel que $t = t_0 + \Delta$. Δ est un intervalle de temps dont la valeur est choisie de manière cohérente avec les temps moyens nécessaires à la dissémination dans le réseau des informations sous-tendant le calcul des forces locales d'interaction et d'alignement. À titre d'illustration, dans le cas des mises en œuvre présentées dans la suite de ce document et en particulier dans les Sections 4.3, 5.3 et 6.2 relatives aux simulations, nous considérons la valeur $\Delta = 1$ s. De même, un éclairage supplémentaire sur la mise en place concrète de ce modèle sur des nœuds d'expérimentation sera apporté dans la Section 7.2.

3.2 Conception de la solution protocolaire VFP

3.2.1 Objet du message Balise

La mise en œuvre distribuée des mécanismes de forces virtuelles dans le cadre de communications sans fil, où chaque transmission est effectuée avec une portée limitée, requiert de pouvoir diffuser dans le réseau les informations qui permettront à l'ensemble des nœuds concernés de calculer les effets des forces auxquelles ils sont soumis. Par conséquent, les solutions protocolaires à base de forces virtuelles que nous introduisons en fin de Sous-section 3.2.3, et étudions dans les chapitres suivants, utilisent toutes un message spécialement défini à cet effet, le *message Balise*. L'émission régulière de ce message permet à chaque nœud du réseau participant à la stratégie coopérative de mobilité contrôlée de diffuser dans son entourage un certain nombre d'informations essentielles au déplacement adéquat des nœuds soumis aux forces virtuelles, mais aussi à la création et à la maintenance des chaînes de communications entre les sources et destinations de trafic utilisateur. Nous allons voir dans la suite de cette sous-section que deux versions du message Balise ont été proposées, apportant chacune un ensemble d'informations approprié aux contextes applicatifs dans lesquels ils sont utilisés dans les chapitres suivants.

3.2.2 Description du message Balise simple

Comme précédemment mentionné, le message Balise est un message de contrôle utilisé pour supporter l'échange local d'informations entre nœuds voisins. Ce message,

TABLEAU 3.1 – Le message Balise et ses différents champs

IDNœud	TypeNœud	VecteurPosition	VecteurVitesse	LiensDispos
Prédécesseur	Successeur	Source	Destination	Temps

tel que spécifié par la Table 3.1, contient un ensemble de données relatives au nœud émetteur permettant d'estimer les forces d'interaction locales que ce nœud pourrait appliquer sur le nœud recevant ce message Balise. Le message Balise contient des informations d'identification sur le nœud émetteur : IDNœud donne son identificateur unique dans le réseau, tandis que TypeNœud précise sa fonction principale (définie par son type) à l'instant où le message est émis. TypeNœud peut par exemple indiquer que le nœud a une fonction de relais (il est donc de type nœud-relais) et qu'il sera soumis à des forces virtuelles. Les types possibles de ce champ seront précisés dans chaque scénario applicatif dans les chapitres suivants, en particulier dans les Sections 4.2, 5.2 et 6.1. Le champ VecteurPosition, qui fournit les coordonnées du nœud émetteur à l'instant de l'émission du message Balise, est abondamment utilisé dans le calcul des forces virtuelles émises par ce nœud. Les autres champs sont quant à eux utilisés essentiellement pour permettre la bonne formation et maintenance des chaînes de communication : Destination précise si le nœud émetteur appartient à une chaîne de communication, et si oui donne l'identificateur unique IDNœud du nœud destination du trafic devant être acheminé par la chaîne. De la même manière, Source fournit, si applicable, l'identificateur du nœud source du trafic à l'origine de la chaîne. De plus, les champs Prédécesseur et Successeur informent de l'éventuelle existence d'un prédécesseur (respectivement d'un successeur) au nœud émetteur dans la chaîne de communication, et le cas échéant donnent leur identificateur unique IDNœud. Les informations restantes sont enfin utiles pour les processus d'élection de nouveaux nœuds intermédiaires dans une chaîne de communication. En particulier, LiensDispos indique si le nœud émetteur est en recherche d'un nouveau nœud intermédiaire. Si LiensDispos = 1, alors le nœud recevant cette information peut, selon sa fonction principale et le contexte, faire acte de candidature auprès du nœud émetteur dans l'objectif de devenir un nœud-relais dans la chaîne de communication. Les détails de ce processus distribué d'élection, permis par ce champ LiensDispos, sont donnés dans la Sous-section 3.2.4. De même, bien que non utilisé dans les mises en œuvre de stratégies de mobilité contrôlée des chapitres suivantes, le champ VecteurVitesse pourrait être exploité lors des processus d'élection distribuée pour choisir un nouveau nœud intermédiaire sur la base de critères additionnels, en particulier en termes de direction et de vitesse des nœuds candidats. Enfin, le champ Temps donne le temps écoulé, en secondes, depuis que le message considéré a été initialement diffusé par son nœud émetteur. Dans le cas du message Balise simple, on fixe par convention Temps = 0, dans la mesure où on néglige les temps de transmission. Plus d'informations relatives à la signification et à l'utilisation de ce champ sont données dans la sous-section suivante.

3.2.3 Description du message Balise étendu

Nous avons vu que le message Balise, tel que décrit dans la Sous-section 3.2.2, est le vecteur de dissémination des informations permettant aux nœuds voisins de calculer les forces d'interaction locales susceptibles d'être exercées par le nœud émetteur. Par contre, puisque ce message de contrôle ne contient que les informations relatives au nœud émetteur, ce dernier n'est pas capable de transmettre par ce moyen les informations relatives aux nœuds qu'il a pu découvrir au cours de son déplacement. Tant que le scénario applicatif ne requiert pas la mise en œuvre de forces d'alignement, comme ce sera le cas dans

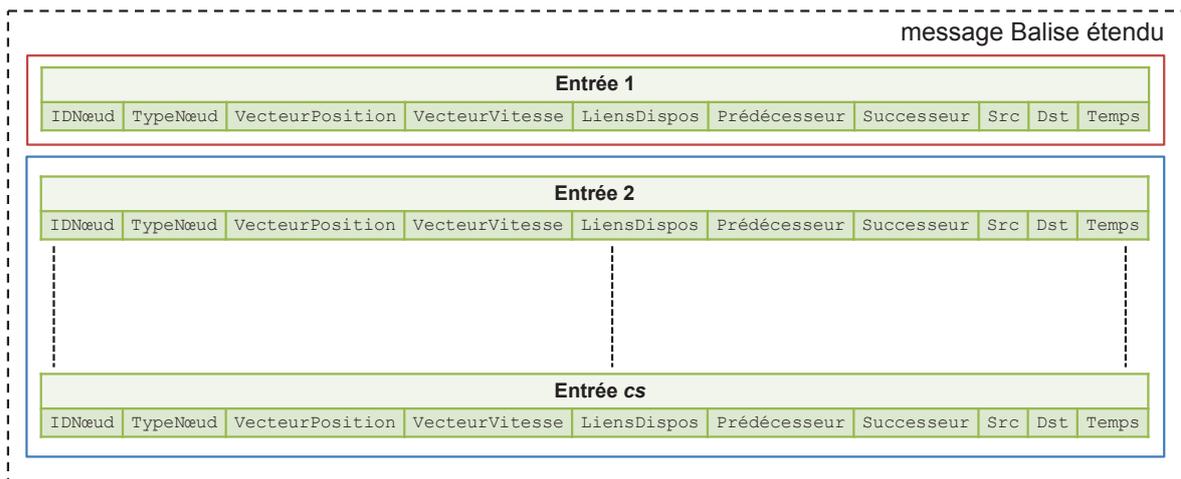


FIGURE 3.9 – Le message Balise étendu et ses différents champs. La première entrée, encadrée en rouge, est obligatoire. Les $cs - 1$ entrées restantes sont optionnelles.

le Chapitre 4, les topologies réseau en chaîne désirées pourront être correctement réalisées par la stratégie de mobilité utilisant un tel message Balise. En revanche, ce message ne suffit plus dès lors que la mise en œuvre d’une composante d’alignement est rendue nécessaire. À cet effet, nous en définissons ici une version complétée que nous appelons *message Balise étendu*. La Fig. 3.9 en donne une représentation. On constate que ce message est partitionné en *entrées*, qui représentent chacune une série d’informations sur un nœud du réseau, chaque entrée étant structurée de manière similaire à un message Balise simple. En particulier, la première entrée, obligatoire et toujours relative au nœud ayant émis le message Balise étendu, est identique à un message Balise simple. En conséquence, le champ IDNœud de la première entrée est toujours l’identificateur unique de l’émetteur du message. Dans un message Balise étendu, cette première entrée peut être suivie de $(cs - 1)$ entrées optionnelles, avec $cs \geq 1$. Chacune de ces entrées optionnelles correspond aux dernières informations relatives à un nœud du réseau que l’émetteur a directement rencontré (via un contact en portée radio directe) ou indirectement découvert (via la réception d’un message Balise étendu provenant d’un autre émetteur). À ce sujet, nous verrons dans le Chapitre 5 que la valeur de cs tout comme la manière dont sont choisies les entrées à insérer dans un message Balise étendue peuvent varier et dépendent de la stratégie de mobilité contrôlée considérée.

Utilisation du champ Temps Ce champ, déjà introduit dans la Sous-section 3.2.2, prend ici tout son intérêt pour évaluer la fraîcheur des informations relatives à un nœud du réseau. Si $\text{Temps} = 0$ pour la première entrée relative au nœud émetteur, comme vu précédemment, ce champ n’est en revanche pas nul pour les autres entrées optionnelles du message : pour chacune de ces entrées, relative au nœud d’identificateur IDNœud, le champ Temps donne en effet une estimation du temps écoulé, en secondes, depuis que les informations de cette entrée ont été initialement émises par le nœud IDNœud. On notera à ce sujet que ce temps ne s’appuie pas sur une référence de temps absolue (on suppose que les horloges des différents nœuds du réseau peuvent être désynchronisées), mais consiste en la somme des temps passés dans les différents nœuds ayant retransmis, de saut en saut, les informations relatives à ce message, tout en négligeant les temps de transmission eux-mêmes. Afin de donner une illustration concrète de la manière dont est calculé un tel temps, la Fig. 3.10 donne l’exemple de 3 nœuds N_1 , N_2 et N_3 qui sont amenés chacun à émettre un message Balise étendu :

- On suppose dans cet exemple qu’à un instant t_0 , N_1 émet un message Balise, qui est

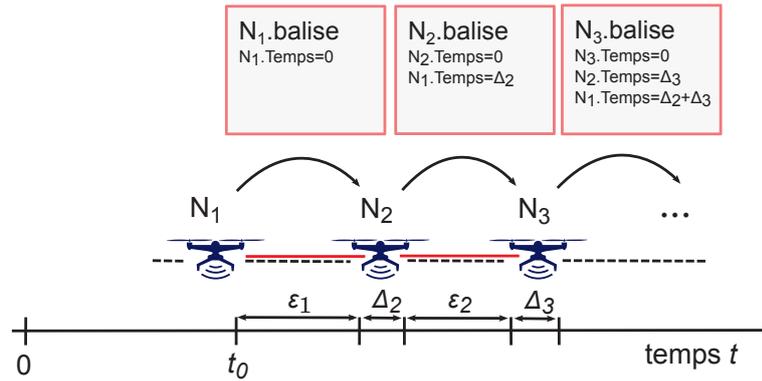


FIGURE 3.10 – Exemple de calcul des champs Temps dans un scénario à trois nœuds N_1 , N_2 et N_3 et pour trois émissions de messages Balise étendus.

reçu par son voisin N_2 à $t_0 + \epsilon_1$. Pour la première entrée de ce message, relative au nœud émetteur comme expliqué précédemment, le champ $IDN_{\text{nœud}}$ sera l'identificateur unique du nœud N_1 , tandis que $\text{Temps} = 0$. En outre, le nœud N_2 note le temps de réception (selon sa propre horloge) à la réception de ce premier message Balise.

- Par la suite, au moment de créer puis envoyer son prochain message Balise (qui est le deuxième message Balise illustré dans cet exemple), le nœud N_2 note son temps d'horloge, puis calcule le délai Δ_2 pendant lequel les informations relatives au nœud N_1 sont restées stockées dans ses bases de données locales en effectuant une simple soustraction de temps locaux. Comme les délais de transmission sont négligés (en particulier ϵ_1 , que N_2 ne connaît pas plus que la dérive d'horloge entre N_1 et N_2), le nœud N_2 , s'il souhaite insérer une entrée relative au nœud N_1 dans son prochain message Balise, n'a qu'à rajouter Δ_2 à la valeur de Temps qu'il a associé à N_1 (c'est-à-dire 0) lors de la dernière réception d'une entrée relative à ce nœud. La première entrée du prochain message Balise de N_2 contiendra donc une valeur de Temps égale à 0, et pour l'entrée relative à N_1 , si applicable, une valeur de Temps égale à Δ_2 .
- De la même manière, le nœud N_3 , qui reçoit dans cet exemple le second message Balise, enregistre le temps local de réception de ce message, et associe ce temps aux informations relatives à N_1 et N_2 qu'il reçoit. Au bout d'un délai Δ_3 , lorsque N_3 prépare son prochain message Balise (le troisième et dernier message illustré dans cet exemple), il associe pour lui-même une valeur $\text{Temps} = 0$, pour N_2 une valeur $\text{Temps} = \Delta_3$ et pour N_1 une valeur $\text{Temps} = \Delta_2 + \Delta_3$.

Ainsi, lorsqu'une stratégie de mobilité contrôlée utilisant la version étendue des messages Balise est mise en œuvre, le champ Temps joue un rôle important dans la confiance qu'un nœud peut avoir sur les informations relatives à un autre nœud reçues précédemment par un message Balise. Dans cette optique, ce champ temps permet de choisir quelles données conserver, lorsque des informations relatives à un même nœud sont reçues de messages Balise différents. En effet, lorsqu'un nœud reçoit des informations relatives à un autre nœud d'identificateur $IDN_{\text{nœud}}$ déjà découvert à un temps antérieur, le temps associé aux données du nœud $IDN_{\text{nœud}}$ précédemment reçues (c'est-à-dire le temps indiqué par le champ Temps lorsque ces données ont été extraites du message Balise, auquel est rajouté l'intervalle de temps pendant lequel ces informations ont depuis été localement conservées) est comparé au champ Temps du message Balise qui contient les données du nœud $IDN_{\text{nœud}}$ nouvellement reçues. Par la suite, seules les données du nœud $IDN_{\text{nœud}}$ relatives à l'intervalle de temps le plus faible sont conservées.

Dans la sous-section suivante, nous allons nous intéresser à la manière dont les données issues des messages Balise sont utilisées par une stratégie de mobilité contrôlée

pour former et maintenir des chaînes de communication. En particulier, les mécanismes d'insertion et retrait des nœuds intermédiaires d'une chaîne vont être présentés.

3.2.4 Formation et maintenance d'une chaîne VFP

La dissémination des informations issues des messages Balise permet non seulement l'application des forces virtuelles exercées à distance sur les nœuds, mais aussi la mise en œuvre de mécanismes coopératifs visant à former et maintenir des chaînes de communications adaptées aux besoins applicatifs, c'est-à-dire permettant de relayer efficacement le trafic entre les nœuds de trafic du réseau. Nous allons décrire plus particulièrement comment un nœud du réseau est choisi pour prendre le rôle de nœud-relais, sur quels critères et comment un nœud-relais peut être retiré d'une chaîne existante et enfin quels sont les autres mécanismes principaux d'entretien de la chaîne, afin de maintenir la cohérence des informations entre les différents nœuds-relais dans un contexte par nature distribué.

Élection et insertion d'un nouveau nœud intermédiaire

Le mécanisme distribué d'insertion d'un nouveau nœud-relais dans une chaîne de communication existante s'appuie sur un échange de messages Balise entre un nœud appartenant déjà à la chaîne, et qui va prendre la décision d'insérer un nouveau nœud relais, et un ensemble de nœuds environnants ne faisant pas partie de la chaîne, et qui vont pouvoir se porter candidat pour prendre le rôle de nœud-relais. La décision initiale du nœud de la chaîne de chercher à insérer un nouveau nœud-relais peut s'appuyer sur différentes considérations. S'il n'existe pas encore de chaîne de communication, cette décision initiale d'insérer un premier nœud-relais est naturellement prise par le nœud source d'un trafic à transférer à un nœud destination, si la source n'est pas déjà en contact avec la destination par une route existante. De plus, dans le cadre des mises en œuvre des chapitres suivants, cette prise de décision se fait sur la base de l'évaluation de la distance entre le nœud considéré et son prédécesseur dans la chaîne, si la chaîne est déjà constituée. Dès lors, le nœud appartenant à la chaîne modifie le contenu de sa propre entrée de ses prochains messages Balise, pour avertir les nœuds environnants ne faisant pas partie de la chaîne que des candidats sont recherchés pour jouer le rôle de nœud-relais. Les nœuds décidant de se porter candidats à ce rôle modifient également leur propre entrée dans leurs futurs messages Balise, pour faire savoir qu'ils sont candidats. Le nœud de la chaîne, ayant pris connaissance de ces candidatures à la réception des messages Balise des nœuds concernés, choisit parmi le(s) candidat(s) le nœud-relais, et décide selon le scénario de l'insérer soit comme successeur, soit comme prédécesseur. Le successeur et le prédécesseur actuels, tout comme le nouveau nœud-relais et les candidats écartés, prennent confirmation de l'identité du nouveau nœud-relais et agissent en conséquence : les candidats écartés continuent à remplir leurs fonctions initiales, tandis que le nouveau nœud-relais endosse son nouveau rôle. Si celui-ci est inséré comme successeur du nœud existant, alors le successeur actuel considère non plus ce dernier comme son prédécesseur, mais le nouveau nœud-relais. Si au contraire ce dernier est inséré comme prédécesseur du nœud existant, alors le prédécesseur actuel considère non plus ce dernier comme son successeur, mais le nouveau nœud-relais. Selon ces cas, le nouveau nœud-relais note ses nouveaux prédécesseur et successeur dans la chaîne.

Afin d'illustrer concrètement ce mécanisme général, la Fig. 3.11 donne un exemple simple d'une chaîne existante $[N_1, N_2]$ pour laquelle N_2 détermine qu'il s'éloigne significativement de N_1 et qu'il est temps d'essayer d'insérer un nouveau nœud-relais entre N_1 et lui-même. Nous allons voir comment N_3 est choisi par N_2 pour constituer le nouveau nœud-relais de la chaîne $[N_1, N_3, N_2]$. Pour cela, parmi les divers messages Balise

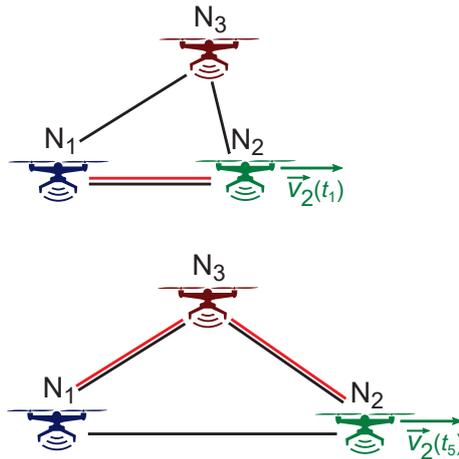


FIGURE 3.11 – Scénario d'insertion d'un nouveau nœud-relais N_3 dans une chaîne existante $[N_1, N_2]$.

émis, 5 sont retenus en particulier pour analyse. Ceux-ci sont émis aux temps t_1, t_2, \dots, t_5 et leurs champs utiles pour l'explication du mécanisme d'insertion sont représentés dans la Fig. 3.12 :

- Le premier message Balise est émis par le nœud N_2 avant le démarrage du mécanisme distribué d'insertion de chaîne.
- En revanche, le second message Balise, toujours émis par N_2 , matérialise la décision de ce dernier de prendre une action suite à son éloignement de N_1 . Pour cela, il fait savoir à son voisinage, au moyen de la valeur de champ `LiensDispos = 1`, qu'une nouvelle fonction de nœud intermédiaire est disponible dans la chaîne à laquelle N_1 et N_2 appartiennent. On notera que cette appartenance est connue grâce à la paire de champs (`Source`, `Destination`), non représentée dans la figure pour des raisons de lisibilité. Une telle valorisation de `LiensDispos` permet ainsi à N_2 d'envoyer un appel à candidature dans son entourage à portée de *broadcast* radio.
- Chaque nœud situé dans le voisinage de N_2 ayant reçu le second message Balise et décidant de postuler à la fonction de nouveau nœud-relais dans la chaîne considérée va modifier son message Balise pour faire savoir à N_2 qu'il est candidat. On notera qu'une condition nécessaire pour qu'un tel nœud décide de se porter candidat est qu'il soit en proximité à la fois de N_2 et de son prédécesseur ou son successeur dans la chaîne, selon la mise en œuvre effectuée. Le type de modification apportée au message Balise est l'indication de l'appartenance de la chaîne en indiquant le couple (`Source`, `Destination`) (non illustré ici), et la valorisation des champs `prédécesseur` et `successeur`. Selon la position relative des nœuds candidats, ceux-ci indiquent s'ils peuvent s'insérer en considérant N_2 comme prédécesseur ou successeur : dans le premier cas, ils doivent être en proximité du successeur actuel de N_2 et l'indiquer comme successeur. Dans le second cas, ils doivent être en proximité du prédécesseur actuel de N_2 et l'indiquer comme prédécesseur. À titre d'exemple, dans la Fig. 3.12, le nœud N_3 se porte candidat en considérant, de par sa position géographique, N_2 comme successeur et N_1 comme prédécesseur. Le troisième message Balise est construit de cette manière et émis par N_3 . Il est important de souligner qu'à ce stade, N_3 ne se considère pas encore comme nœud-relais, et n'a d'ailleurs pas encore modifié, à cette étape, sa fonction indiquée par `TypeNœud`.
- Au bout d'un temps prédéfini, N_2 évalue l'ensemble des candidatures sur la base des messages Balise qu'il a reçues. Dans l'exemple, il n'a reçu qu'une candidature, de la part de N_3 . S'il n'a pas obtenu de candidature satisfaisante, il attend que des candidats se déclarent à la suite de l'émission de messages Balise ultérieurs. Si plus

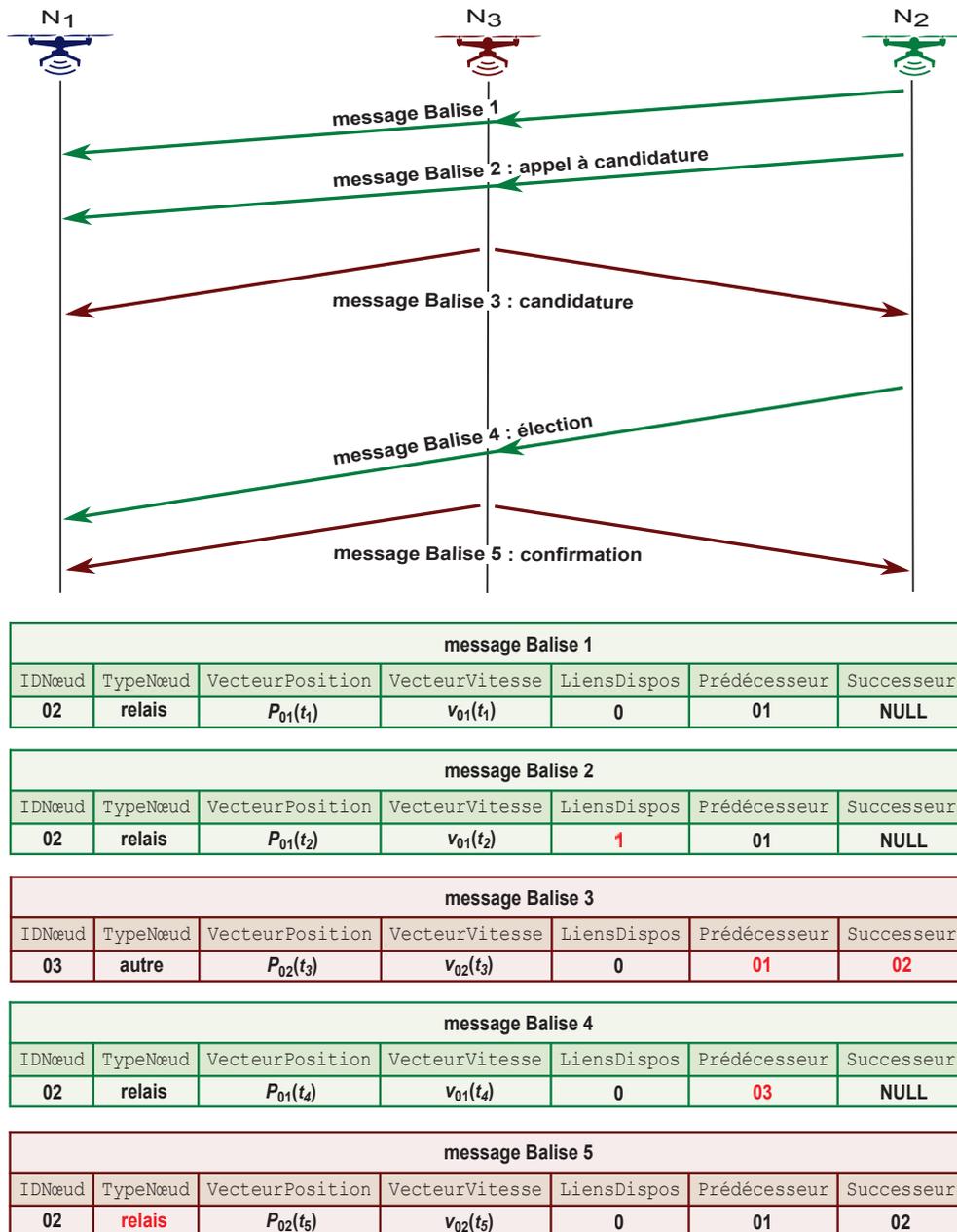


FIGURE 3.12 – Détail des messages Balise échangés dans le contexte d'un scénario d'insertion d'un nouveau nœud-relais N_3 dans une chaîne existante $[N_1, N_2]$.

d'une candidature est jugée valide par N_2 , celui-ci choisit un candidat en particulier et renvoie une confirmation de l'identité du nouveau nœud-relais en modifiant son prochain message Balise en conséquence. Cette confirmation est utile au candidat retenu pour savoir qu'il a été élu, aux éventuels candidats supplémentaires qui n'ont pas été choisis, mais aussi aux autres nœuds-relais de la chaîne situés en proximité, de manière à ce qu'ils puissent également connaître l'identité du nouveau nœud-relais. Toujours dans l'exemple considéré, N_2 indique, par la valeur modifiée du champ Prédécesseur, que son prédécesseur est maintenant N_3 . Ce message est reçu tout aussi bien par N_3 que N_1 , tous deux supposés en proximité de N_2 . On notera de plus que les critères de sélection du nouveau nœud-relais peuvent varier selon la mise en œuvre, et peuvent se baser par exemple sur des considérations de latence, de distance, de vitesse, etc. Dans la suite de cette étude, l'ensemble des solutions protocolaires proposées utilisent un mécanisme d'élection s'appuyant sur

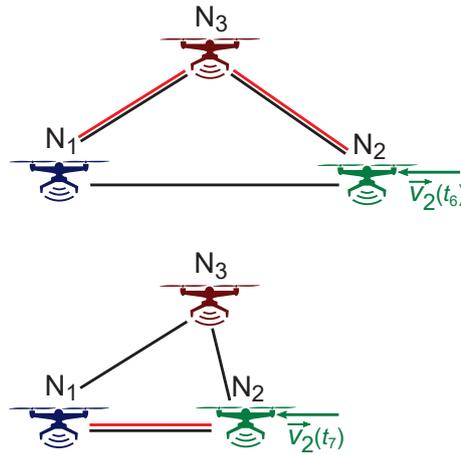


FIGURE 3.13 – Scénario de suppression d'un nœud-relais N_3 d'une chaîne existante $[N_1, N_3, N_2]$.

le choix du candidat le plus rapide à répondre.

- Enfin, le nœud nouvellement élu (ici N_3) prend acte de la décision (ici prise par N_2) de l'insérer dans la chaîne, en endossant le rôle de nœud-relais et en modifiant en conséquence la valeur du champ $IDN_{\text{nœud}}$ de ses prochains messages Balise. Les nœuds voisins de ce nouveau nœud-relais, comme ici N_1 et N_2 , auront ainsi confirmation que ce dernier a effectivement pris en compte la décision d'insertion dans la chaîne, et pourront alors modifier leur propre vision de la topologie de la chaîne et, de fait, le contenu de leurs prochains messages Balise.

Suppression d'un nœud intermédiaire

Le mécanisme de suppression d'un nœud-relais d'une chaîne est similaire au mécanisme d'insertion précédemment détaillé. La décision de suppression est en effet prise, selon la mise en œuvre de la solution de mobilité, par le prédécesseur ou le successeur du nœud-relais à supprimer, et cette décision peut de la même manière s'appuyer sur des considérations de différente nature. Ici aussi, les messages Balise émis par les différents nœuds de la chaîne permettent de mettre en œuvre ce mécanisme de suppression. Dans ce contexte, la Fig. 3.13, qui reprend les notations et le contexte de la Fig. 3.11, illustre le cas simple d'une chaîne existante $[N_1, N_3, N_2]$ pour laquelle N_2 se rapproche non seulement de son prédécesseur N_3 , mais aussi du prédécesseur N_1 de celui-ci, au point qu'il devient pertinent d'envisager le retrait de N_3 de la chaîne afin d'obtenir une chaîne $[N_1, N_2]$ raccourcie, en ayant libéré N_2 de son activité de nœud-relais. De plus, la Fig. 3.14, détaille, parmi les messages Balise émis suite à la décision de N_2 de retirer N_3 de la chaîne, ceux qui permettent de se rendre compte comment le mécanisme coopératif de retrait est mis en œuvre :

- Dans l'exemple, le nœud N_2 a pris la décision de répudier son prédécesseur N_3 dans la chaîne, par exemple parce que N_2 a détecté que N_1 , le prédécesseur de N_3 était devenu un voisin direct, et que la distance avec celui-ci était descendue sous un seuil prédéfini. À ce sujet, des précisions seront apportées sur les valeurs de ces seuils, lors de la présentation des mises en œuvre des mécanismes à base de forces virtuelles dans des contextes concrets de déploiement, en particulier lors de la présentation des paramètres de simulation donnés dans les Sections 4.3, 5.3 et 6.2. Suite à cette prise de décision, les messages Balise envoyés par N_2 expriment cette répudiation de N_3 . La Fig. 3.14 illustre ainsi l'envoi par N_2 et au temps t_6 d'un tel message, dont le champ Prédécesseur pointe maintenant sur N_1 et non plus sur N_2 .

- À la suite de la réception de ce message Balise, N_3 se rend compte que son retrait de la chaîne est souhaité par N_2 , et prend en compte cette répudiation en stoppant son rôle de nœud intermédiaire dans la chaîne et en reprenant son rôle antérieur. Par la suite, les messages Balise émis par N_3 traduiront donc son retrait de la chaîne : ainsi, dans l'exemple, différents champs du message Balise envoyé au temps t_7 par N_3 ont été modifiés : Prédécesseur et Successeur sont réinitialisés à la valeur NULL, tandis que TypeNœud indique le rôle de N_3 antérieur à son entrée dans la chaîne. On notera que, pour des raisons de lisibilité de la Fig. 3.14, tous les champs et les messages issus des nœuds impliqués ne sont pas représentés : en particulier, les champs Source et Destination des messages Balise de N_3 sont également réinitialisés suite au retrait de la chaîne. De plus, d'autres nœuds de cette chaîne modifient également leur propre message Balise : c'est le cas de N_1 , dont le successeur, antérieurement N_3 , devient N_2 .

Autres aspects de maintenance de la chaîne

Dans le contexte de mise en œuvre des propositions de solutions protocolaires à base de forces virtuelles, dont nous donnons un aperçu dans la sous-section suivante et que nous détaillerons dans les chapitres ultérieurs, tout nœud-relais appartenant à une chaîne de communication vérifie régulièrement que son appartenance à cette chaîne reste pertinente. Cette notion de pertinence repose sur deux séries de critères :

La proximité géographique du nœud-relais avec son prédécesseur et son successeur :

- Un nœud-relais doit recevoir régulièrement un message Balise de la part de son prédécesseur (si applicable). Si aucun message Balise n'est reçu en provenance de ce dernier depuis plus d'un délai prédéfini $T_PRÉDÉCESSEUR$, alors le nœud-relais considère que la chaîne est invalide. En conséquence, il se retire de cette chaîne, tout en changeant la valeur du paramètre TypeNœud de ses prochains messages Balise, de manière à faire savoir qu'il est revenu à la fonction réseau antérieure à son

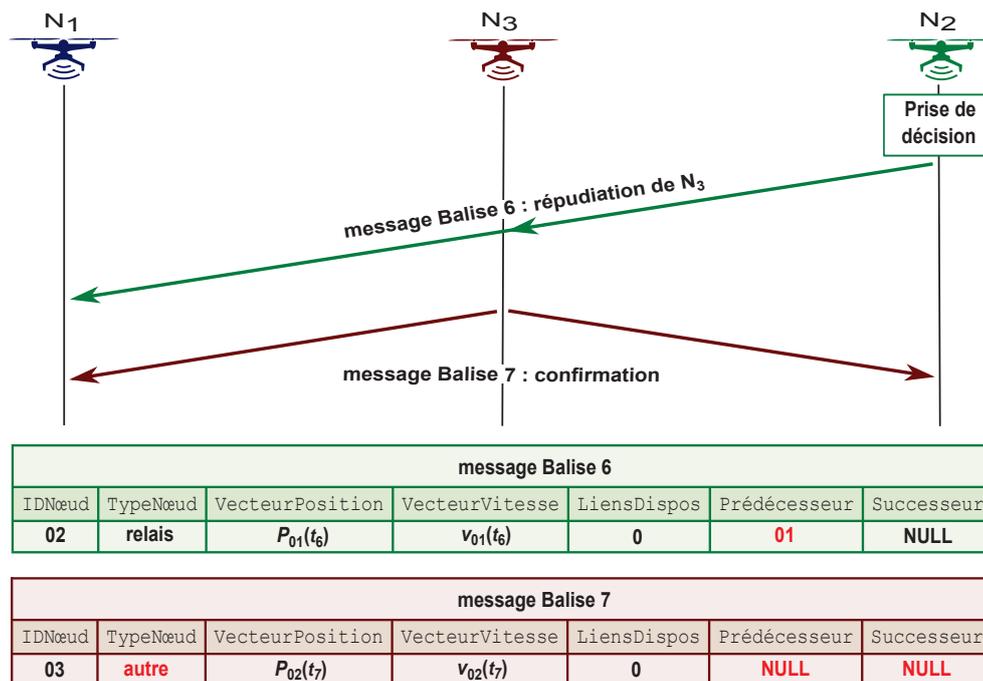


FIGURE 3.14 – Détail des messages Balise échangés dans le contexte d'un scénario de suppression d'un nœud-relais N_3 dans une chaîne existante $[N_1, N_3, N_2]$.

insertion dans ladite chaîne. Les autres champs du message Balise relatifs à l'appartenance à une chaîne (i.e. `LiensDispos`, `Prédécesseur`, `Successeur`, `Source` et `Destination`) sont également réinitialisés.

- De manière similaire, un nœud-relais doit recevoir régulièrement un message Balise de la part de son successeur (si applicable). Si aucun message Balise n'est reçu en provenance de ce dernier depuis plus d'un délai `T_SUCCESEUR`, alors le nœud-relais se retire de la chaîne en question et revient à sa fonction antérieure à son insertion dans ladite chaîne, tout en modifiant en conséquence la valeur de `TypeNœud` ainsi que celles des autres champs relatifs à l'appartenance à une chaîne (i.e. `LiensDispos`, `Prédécesseur`, `Successeur`, `Source` et `Destination`) des prochains messages Balise.

La cohérence de la topologie de la chaîne vue par le nœud-relais. La manière dont la chaîne est vue par le prédécesseur et le successeur (si applicable) d'un nœud-relais doit être cohérente avec les propres informations de ce dernier. Cette homogénéité des perceptions est vérifiée par le nœud-relais considéré en comparant les informations reçues dans les messages Balise avec ses informations locales. Sur cette base, il procède en particulier aux vérifications suivantes :

- Tout d'abord, le nœud-relais considéré, par construction, doit avoir un prédécesseur.
- Le prédécesseur du nœud-relais, si applicable, doit avoir un successeur (donné par le champ `Successeur` de son message Balise) initialisé et égal à l'identifiant du nœud-relais.
- De la même manière, le successeur du nœud-relais, si applicable, doit avoir un prédécesseur (donné par le champ `Prédécesseur` de son message Balise) initialisé et égal à l'identifiant du nœud-relais.
- Les fonctions des prédécesseur et successeur (si applicable) du nœud, données par les champs `TypeNœud` des messages Balise en provenance de ces nœuds, doivent être compatibles avec leur appartenance à la chaîne.
- Le nœud-relais, son prédécesseur et son successeur, si applicable, doivent avoir les mêmes valeurs pour les champs `Source` et `Destination`.

Si une quelconque de ces conditions n'est pas vérifiée, le nœud-relais considère que la chaîne est invalide, et se retire de cette chaîne, tout en revenant à sa fonction antérieure à son insertion dans ladite chaîne. Enfin, le nœud modifie son message Balise en conséquence.

3.2.5 Variantes VFPS, VFPe et VFPC du protocole VFP

Dans la suite de ce document, trois solutions protocolaires issues des mécanismes venant d'être présentés dans ce chapitre seront étudiées et évaluées. Chacune de ces variantes permet de juger de l'intérêt et de la performance de l'utilisation d'une stratégie de mobilité contrôlée s'appuyant sur des principes de forces virtuelles dans le contexte de différents scénarios applicatifs et de déploiements réseau :

VFPS (VFP simple) est une solution protocolaire mettant en œuvre des messages Balise simples, comme vus dans la Sous-section 3.2.2. Cette stratégie, qui sera détaillée dans le Chapitre 4, est adaptée aux scénarios de déploiement pour lesquels les besoins applicatifs sont tels que les nœuds intermédiaires d'une chaîne restent naturellement alignés. En conséquence, seules les forces virtuelles d'interactions locales (i.e. forces d'attraction-répulsion et de frottement) sont mises en œuvre.

VFPe (VFP étendu) s'appuie en revanche sur l'utilisation de messages Balise étendus, tels que présentés dans la Sous-section 3.2.3. Le Chapitre 5 détaillera les spécificités de cette extension de VFP, qui met en œuvre non seulement des forces virtuelles d'interaction locales, mais également des forces virtuelles d'alignement.

VFPC (VFP inter-couches) est enfin une extension de VFPe, utilisant également des messages Balise étendus et mettant en œuvre comme VFPe la totalité des forces virtuelles décrites dans la Section 3.1. Cependant, la particularité de VFPC, comme nous le verrons dans le Chapitre 6, est de pouvoir s'appuyer, de manière contextuelle, sur un protocole de routage aussi bien de type [MANET](#) que [DTN](#).

Pour finir, il est utile de noter que dans la suite de ce document, **VFP** désigne l'ensemble des mécanismes algorithmiques et protocolaires qui viennent d'être exposés dans ce chapitre. On fait référence par exemple à une *chaîne de communication VFP* ou à une stratégie qui met en œuvre des *mécanismes VFP*.

Chapitre 4

Impact des paramètres-clés de VFPs

Sommaire

4.1 Contexte et scénario	45
4.1.1 Introduction	45
4.1.2 Le contexte d'étude	45
Les principales approches de lutte contre le frelon asiatique	46
Les stratégies existantes de localisation des nids	46
Automatisation et accélération des recherches	47
4.2 Scénario réseau	48
4.2.1 Types de nœuds	48
4.2.2 Motifs de mobilités	49
4.2.3 Déroulement du scénario	50
4.3 Incidence des paramètres-clés de VFPs sur la performance réseau	51
4.3.1 Hypothèses de simulation	51
4.3.2 Impact des tailles relatives des zones d'interaction	54
Impact sur la topologie attendue	54
Performance réseau pour des flux utilisateurs à bas débit	55
Conséquences de l'augmentation du débit des flux utilisateurs	59
4.3.3 Impact du paramètre I d'intensité de force d'attraction/répulsion	64
PDR	65
Délai de bout-en-bout	65
4.3.4 Impact du coefficient de frottement C_x	66
PDR	66
Délai de bout-en-bout	67
4.3.5 Impact des seuils de distance	67
PDR	68
Stabilité de la chaîne de communication	68
Nombre d'UAVs de réserve	70
4.3.6 Enseignements	71

4.1 Contexte et scénario

4.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, un scénario de déploiement réseau s'appuyant sur un ensemble de véhicules mobiles aériens, de type **UAV**, est proposé. Ces derniers sont dotés d'équipements de communication leur permettant de jouer le rôle d'autant de nœuds mobiles, chacun doté de mécanismes de vol autonome et coopératif. De plus, nous présentons dans le reste de cette section le contexte d'étude permettant d'illustrer un environnement applicatif concret, à travers d'une part la description des habitudes de prédation de *Vespa velutina*, le frelon asiatique, qui peuvent compromettre le développement voire l'existence même des populations d'abeilles domestiques. D'autre part, nous introduisons et détaillons, dans une optique de lutte contre la progression de cette espèce invasive, la problématique liée à l'identification automatisée des nids de *V. velutina* autour des ruches d'abeilles domestiques. Ce contexte nous permet ainsi de montrer comment l'utilisation d'un ensemble d'**UAV** dotés de mécanismes de mobilité contrôlée permet d'envisager l'accélération des phases de recherche des nids de *V. velutina*. Dans ce cadre, nous détaillons à partir de la Section 4.2 un scénario de déploiement réseau permettant la mise en œuvre de cette recherche et pour lequel les nœuds mobiles de communication sont dotés d'un motif de mobilité adapté. Celui-ci repose en particulier sur la stratégie VFPs et donc sur l'utilisation de messages Balise simples, comme présenté précédemment dans la Sous-section 3.2.2. Nous allons voir que ce scénario réseau permet à l'ensemble d'**UAV** considéré de suivre la trace de spécimens de *V. velutina* jusqu'à leurs nids tout en maintenant la connectivité réseau avec une station au sol à travers une route à sauts multiples sans fil, afin de permettre la transmission de données applicatives telles que la trajectoire des frelons poursuivis ainsi que les données de télémétrie des véhicules mobiles aériens. Afin d'atteindre les objectifs de cette mission avec un minimum d'**UAV**, nous cherchons à identifier, à partir de la Section 4.3, les plages de valeurs pour les paramètres-clés de VFPs aboutissant aux meilleures performances du réseau constitué par l'ensemble des nœuds considérés.

4.1.2 Le contexte d'étude

V. velutina, aussi bien connu sous le nom vernaculaire de frelon asiatique que celui de frelon à pattes jaunes, est un insecte appartenant à l'ordre des hyménoptères, qui contient également d'autres espèces proches comme celles des abeilles, des guêpes et des bourdons. La sous-espèce *V. velutina* ssp. *nigritorax* de ce frelon originaire d'Asie a été pour la première fois observée en France en 2004, suite probablement à une introduction accidentelle. Elle s'est depuis rapidement implantée sur le territoire français métropolitain, à l'exception, à la date de rédaction de ce chapitre, de quelques régions de l'est du pays ainsi que de la Corse [69]. La progression géographique très rapide du frelon asiatique inquiète donc les apiculteurs, d'autant plus que la part protéinée du régime alimentaire de cette espèce est composée à 80% d'abeilles en zone urbaine et de 45 à 50% en zone rurale [70]. De plus, les abeilles européennes n'ont jusqu'alors fait montre d'aucune stratégie de défense efficace contre la prédation du frelon asiatique. Ce dernier n'ayant pas lui-même de prédateur identifié en Europe, et prenant très facilement l'ascendant territorial sur le frelon commun, *V. crabro*, il n'existe actuellement aucun facteur naturel empêchant *V. velutina* de prospérer et de déséquilibrer l'écosystème européen, en décimant en particulier une part significative des colonies d'abeilles en France. En outre, il n'existe actuellement aucune méthode à l'efficacité démontrée qui permettrait de prétendre enrayer la progression du frelon asiatique. Plusieurs approches sont néanmoins explorées :

Les principales approches de lutte contre le frelon asiatique

Le piégeage L'efficacité et le caractère sélectif de divers types de systèmes sont à l'étude et testés depuis plusieurs années. Actuellement, mettre en place ce type de dispositif permet essentiellement d'éliminer d'une part quelques reines fondatrices entre février et avril (et de fait empêcher la constitution d'un certain nombre de nouvelles colonies et ainsi freiner la propagation géographique de l'espèce), et de détecter le reste de l'année la présence d'individus, permettant par la suite une action de recherche et de destruction de nids. Il est à noter que la pertinence de cette approche est encore fortement débattue, la sélectivité des pièges n'étant souvent pas jugée suffisante sur le terrain [71].

L'utilisation de parasitoïdes Il a été récemment montré qu'une mouche parasitoïde européenne, *Conops vesicularis*, est capable de parasiter, et de détruire, les reines de *V. velutina* [72]. Bien que la mise en place de cette approche puisse contribuer à freiner l'expansion du frelon asiatique, la principale incertitude consiste en un risque non correctement évalué que cet insecte parasite également par effet de bord d'autres hyménoptères tels qu'abeilles, guêpes et bourdons. En conséquence, les auteurs estiment eux-mêmes que plusieurs années seront nécessaires pour mesurer ces risques.

La destruction des nids La majeure partie des stratégies d'éradication de *V. velutina* passe par une destruction systématique des nids. Cette destruction est compliquée par la variabilité des habitudes liées au lieu de nidification de l'espèce [73] : cette nidification, de forme généralement sphérique et composée de fibre de cellulose mâchée, s'effectue pour moitié dans la frondaison des arbres, pour un tiers sous des abris aérés, et pour le reste dans des localisations variées (ex. sol, murs, arbres creux, mobilier urbain, ...). De plus, la période de destruction est un paramètre important, sachant que le maximum de nids doit être détruit avant le début de la production des nouvelles fondatrices, en début d'été [73]. Un troisième élément d'importance est de s'assurer que le mode de destruction permet l'élimination de la colonie complète, sachant qu'une destruction incomplète peut généralement aboutir à la reformation d'un autre guêpier par les individus survivants de la colonie, quelques semaines plus tard.

Les stratégies existantes de localisation des nids

La destruction systématique des nids de *V. velutina* est ainsi un élément essentiel des divers procédés de lutte contre la progression de l'espèce. Cette élimination, rendue difficile par la variabilité des lieux de nidification, s'appuie sur une localisation des nids encore essentiellement manuelle. Jusqu'à présent, cette recherche a été réalisée par relevé des directions (assumées être les directions de retour au nid) prises par des individus capturés, puis estimation de la position du nid par intersection de ces directions. La Fig. 4.1 illustre ce mécanisme d'intersection de trajectoires : ici, deux spécimens de *V. velutina* sont capturés aux points A et B, par exemple aux abords de ruches où ils sont susceptibles de se trouver, puis relâchés tandis que la direction de leur envol est notée. L'intersection de ces trajectoires, ici notée I, permet d'estimer de possibles coordonnées pour le nid recherché. Par ailleurs, la présence de paramètres paysagers à proximité des zones de possible présence de nid (ex. point d'eau) permet d'affiner la zone de recherche : dans l'exemple de la Fig. 4.1, la flèche rouge dénote une distance entre un point d'eau et un arbre isolé compatible avec la présence en ce point N, proche de I, du nid recherché. Plus généralement, cette technique permet de localiser un nid dans environ 70% des cas [73]. Il est à noter que même l'utilisation d'une seule direction (ex. si l'on ne dispose que d'individus capturés en un seul lieu, par exemple en proximité d'une ruche) permet déjà de

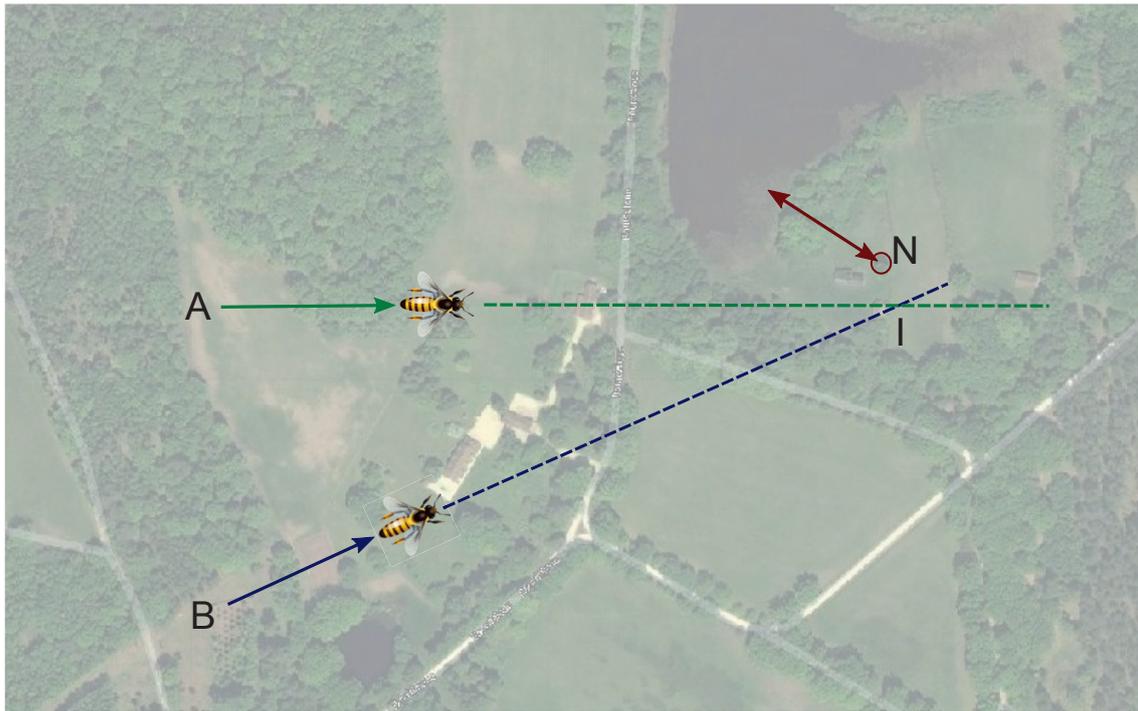


FIGURE 4.1 – Technique de localisation d’un nid de frelon asiatique par intersection de directions. Le point I représente l’intersection des trajectoires des frelons relâchés aux points A et B, tandis que le point N représente la position estimée du nid, en tenant compte à la fois de I ainsi que de paramètres correctifs, tels qu’ici la distance avec un point d’eau, représentée par une flèche rouge.

réduire significativement la zone de prospection autour d’un simple demi-axe.

Automatisation et accélération des recherches

L’utilisation d’UAV légers de basse altitude et de type micro-drones, permettrait d’accélérer significativement les phases de recherche. En substance, de tels nœuds mobiles dotés de possibilités de mobilité autonome pourraient automatiquement réaliser la poursuite des spécimens de frelons asiatiques relâchés, afin de non seulement donner aisément une mesure des directions prises par les insectes, mais également de suivre ces derniers jusqu’à leurs nids. Ainsi, la transmission en temps réel de ces informations à un nœud spécifique situé sur le terrain considéré offrirait la perspective de raccourcir considérablement, voire de supprimer totalement, la phase de calcul des intersections des trajectoires et de prise en compte des paramètres paysager précédemment mentionnés. À cet effet, il est important de noter que ce type de scénario applicatif, qui sera précisé dans la section suivante, suppose la possibilité de capturer des spécimens de *V. velutina* et de les équiper d’un marqueur spécifique. Pour cette étape, un dispositif dérivé d’une cage ou tube à piston, couramment utilisé pour le suivi des abeilles [74], permettrait de mettre en œuvre ce marquage relativement aisément. Une fois équipés d’un dispositif adéquat, ces insectes peuvent ensuite être relâchés, afin de permettre à un nœud mobile tel qu’un véhicule aérien de suivre de manière autonome ces marqueurs, dans le but de relever le plus précisément possible la trajectoire des spécimens relâchés, idéalement jusqu’au nid. En ce qui concerne les systèmes de marquage des frelons, il peut par exemple s’agir :

- D’un marqueur radio. À titre d’exemple, des transpondeurs de radio-identification (RFID) sont souvent utilisés pour le suivi d’abeilles reines [75] ou ouvrières [76], ou d’autres types d’insectes volants comme le bourdon terrestre, *Bombus terrestris* [77]. Il faut cependant noter que ces dispositifs sont généralement mis en œuvre sur la

base de technologies passives, c'est-à-dire avec un gain d'antenne limité et sans présence d'amplificateur alimenté par batterie, pour des raisons de dimensions et de poids. En conséquence, de tels marqueurs possèdent une portée elle-même réduite, de l'ordre de quelques centimètres dans la plupart des cas. Ils sont en conséquence adaptés pour des usages où un lecteur **RFID** pourrait être placé à une position fixe, comme l'entrée d'une ruche [76], susceptible d'être visitée par les individus marqués. Ce n'est néanmoins pas le cas du scénario considéré dans ce chapitre, ce qui exclut l'utilisation d'un tel type de marqueur.

- D'un marqueur visuel, attaché par exemple par un fil entre le thorax et l'abdomen de l'individu (ex. balle légère de polystyrène, ruban, etc.). Dans cette optique, il faut souligner l'intérêt de l'utilisation conjointe des capacités de déplacement des **UAV** ainsi que de divers capteurs de distance et de vision permettant d'identifier et suivre des objets en mouvement. Il faut également noter que ce type de perspective applicative est particulièrement facilité par les avancées régulières en termes de puissance de calcul et d'efficacité énergétique des **systèmes sur puce (SoC)** que l'on peut maintenant communément embarquer sur un **UAV** de format réduit, comme des drones multi-rotors [78], [79]. Ces systèmes ont en particulier permis la mise en œuvre de mécanismes de vision par ordinateur dans un contexte aérien [78], [80]. En conséquence, de telles avancées ont permis l'émergence de nouvelles fonctionnalités et usages pour les véhicules aériens autonomes, au nombre desquels les mécanismes de ravitaillement automatique, d'échantillonnage des sols ou récupération d'une charge utile dans le contexte de services aériens de livraisons [80], des systèmes de suivi de balles lors des événements sportifs [81], la mise en œuvre facilitée sur **UAV** récréatifs de mécanismes de suivi automatisé d'un utilisateur (*follow-me mode*), de même que tout service potentiel requérant que le véhicule suive une cible.

4.2 Scénario réseau

4.2.1 Types de nœuds

Afin de mettre en œuvre le cas d'usage de poursuite de frelon évoqué dans la section précédente, un scénario de déploiement s'appuyant sur des nœuds de différents types est considéré :

- **Un nœud de contrôle, Nc**, qui reçoit, traite et affiche l'ensemble des données de traces et de télémétrie en provenance des autres nœuds. Nc est également destiné à être éventuellement utilisé par un opérateur humain, afin de pouvoir prendre si besoin le contrôle de tout **UAV** du réseau considéré.
- **Un UAV de poursuite, UAV-P**, qui est doté de capacités de vision par ordinateur et de capteurs adéquats, permettant la détection et la poursuite des marqueurs visuels évoqués dans la Sous-section 4.1.2. De fait, UAV-P est capable d'estimer et de relever les trajectoires suivies par les spécimens relâchés de *V. velutina*. Ces informations, de même que la télémétrie d'UAV-P ainsi que diverses autres données applicatives, sont transmises à Nc, comme l'illustre la Fig. 4.2. On notera que dans le contexte de ce scénario applicatif, un seul nœud de type UAV-P est requis.
- **Des UAV-relais, UAV-R**, qui permettent d'établir et de maintenir des routes de communication sans fil à sauts multiples entre UAV-P et Nc, en particulier quand ces deux nœuds ne sont pas en proximité immédiate, en termes de transmission sans fil. Comme représenté par la Fig. 4.3, cette aptitude est permise par l'utilisation combi-

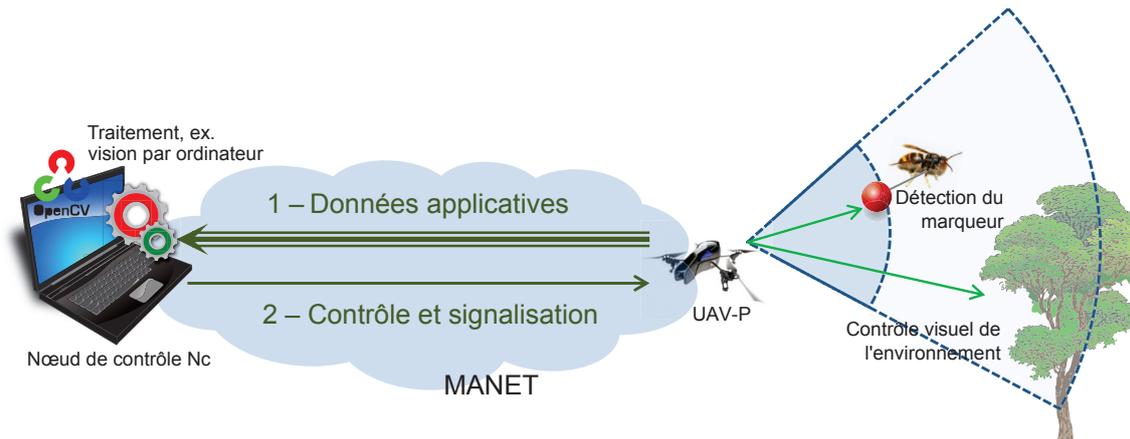


FIGURE 4.2 – Principes de poursuite d'un frelon par UAV-P, représentation des données échangées avec Nc.

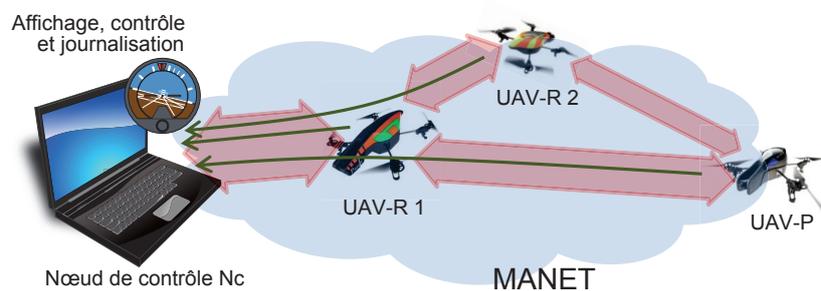


FIGURE 4.3 – Représentation des transmissions de données utilisateurs vers Nc à travers le réseau sans fil à sauts multiples (MANET) composé des UAVs actifs du réseau.

née d'un protocole de routage pour MANET et d'une stratégie de mobilité contrôlée adaptée.

- Enfin, il est important de mentionner l'existence de **nœuds supplémentaires**, nommés **UAV-S**, qui peuvent prendre le rôle, suite à un besoin applicatif, de toute fonctionnalité prédéterminée. En particulier, ces nœuds additionnels sont prêts à endosser temporairement le rôle d'**UAV-relais**, lorsque le nombre de ces derniers est jugé insuffisant dans le réseau. Les UAV-S sont stationnés en mode veille à proximité de Nc, et sont capables de décoller immédiatement lorsque le besoin se présente.

De plus, la totalité des UAVs considérés embarquent une **centrale inertielle (IMU)** de même qu'un système de localisation en extérieur, l'ensemble permettant d'obtenir une estimation de leur position, vitesse et attitude (c'est-à-dire les valeurs de lacet, tangage et roulis de chaque véhicule aérien). En outre, chaque nœud du réseau, Nc y compris, est équipé d'une interface **de communication locale sans fil (WLAN)**, offrant plus précisément dans ce chapitre et les suivants, le support du standard **IEEE 802.11**.

4.2.2 Motifs de mobilités

À l'exception de Nc, qui est supposé rester stationnaire pendant la totalité du déroulement du scénario étudié, tous les autres nœuds du réseau sont susceptibles de se déplacer. À ce titre, trois motifs de mobilité ont été définis pour les **UAV**. Pour UAV-P, l'estimation de position du frelon poursuivi est directement utilisée comme valeur de consigne de la boucle de régulation principale de l'auto-pilote. En conséquence, ce dernier est capable d'effectuer les corrections désirées de trajectoire pour diriger le véhicule aérien vers les coordonnées souhaitées, à une distance prédéterminée de la position estimée du spécimen de *V. velutina* poursuivi. Cette mobilité dépend donc essentiellement de la posi-

tion estimée du marqueur lorsque celui-ci est reconnu par les procédures de vision par ordinateur embarquées sur UAV-P. En complément, une série de cas de sortie est mise en œuvre, comme par exemple la perte de reconnaissance du marqueur par les procédures de vision par ordinateur, la détection d'une position stationnaire de la cible pendant un délai seuil, ainsi que l'épuisement de la source d'énergie primaire de l'UAV. Ces cas de sortie aboutissent généralement à ce qu'UAV-P revienne de manière autonome à sa position de départ afin soit d'y subir une opération de maintenance, ou pour attendre le lâcher du prochain spécimen marqué de *V. velutina*, ou encore dans le but de terminer le déroulement du scénario.

De même, les nœuds supplémentaires UAV-S sont initialement positionnés à proximité immédiate du point d'envol des frelons marqués et relâchés. Ces UAV-S gardent une position stationnaire jusqu'à ce que leur participation active au réseau soit requise, et qu'ils revêtent ainsi le rôle de nœuds-relais UAV-R, comme la Sous-section suivante le détaillera. Lorsque ces nœuds ne sont plus utiles en tant que relais, ceux-ci reprennent leur type initial d'UAV-S, et reviennent de manière autonome à leurs points de départ.

Enfin, les nœuds-relais UAV-R mettent en œuvre une stratégie adaptée de mobilité contrôlée, VFPs, s'appuyant sur l'échange de messages Balise simples, tels que déjà présentés dans la Sous-section 3.2.2. Ces mécanismes de mobilité contrôlée sont ainsi destinés à permettre la formation d'un réseau MANET permettant en particulier d'échanger des données entre les nœuds UAV-P et Nc, que ceux-ci soient en proximité radio immédiate ou non. En pratique, les nœuds-relais sont déplacés là où ils s'avèrent les plus utiles pour former la topologie réseau désirée.

4.2.3 Déroulement du scénario

La Fig. 4.4 donne une représentation générale de la chronologie du déroulé du scénario, à travers un enchaînement de procédures de haut-niveau. Celles-ci illustrent comment est concrètement mise en œuvre la stratégie coopérative de détection et de poursuite d'un spécimen de frelon relâché, et quels sont les cas de sortie du déroulé. En début de scénario, ou lorsqu'une poursuite précédente n'a pas été concluante, une procédure de test permet de vérifier s'il reste des spécimens de *V. velutina* à relâcher. Si oui, un spécimen est relâché, et le déroulé atteint la boucle principale du scénario, identifiée par l'encadrement en pointillés rouges dans la figure. Sinon, le scénario se termine de manière infructueuse.

Dans la boucle principale du déroulé du scénario, UAV-P est en situation de poursuite d'un frelon marqué, et les nœuds UAV-R ont endossé le rôle de nœuds-relais. Plus précisément, le bloc démarre avec un appel aux procédures de démarrage ou de maintenance de poursuite pour le nœud UAV-P, suivi de deux tests successifs permettant de vérifier d'une part qu'une bonne détection par UAV-P du spécimen relâché permet toujours de mettre en œuvre les mécanismes de poursuite, et d'autre part que les paramètres supervisés des nœuds-relais et de poursuite sont toujours dans les intervalles acceptables prédéfinis. Ces paramètres supervisés sont par exemple le niveau d'énergie restant qui ne doit pas descendre sous un certain seuil, les coordonnées du nœud qui ne doivent pas déborder de la zone d'exploration prédéfinie, la vitesse et l'altitude qui ne doivent également pas sortir de l'intervalle acceptable, etc. Si un des tests sort en échec, la procédure de vol retour pour les nœuds-relais et de poursuite est exécutée, sans atterrissage cependant, puis une boucle est réalisée sur la procédure de test initiale vérifiant s'il reste un spécimen à relâcher. Si en revanche les deux tests mentionnés sont concluants, alors les procédures de communication sont appelées, permettant de réaliser les échanges de données protocolaires et utilisateur avec les autres nœuds-relais et de poursuite, puis avec le nœud de contrôle. A l'issue de l'exécution de ces blocs, un test de détection du nid est réalisé : s'il

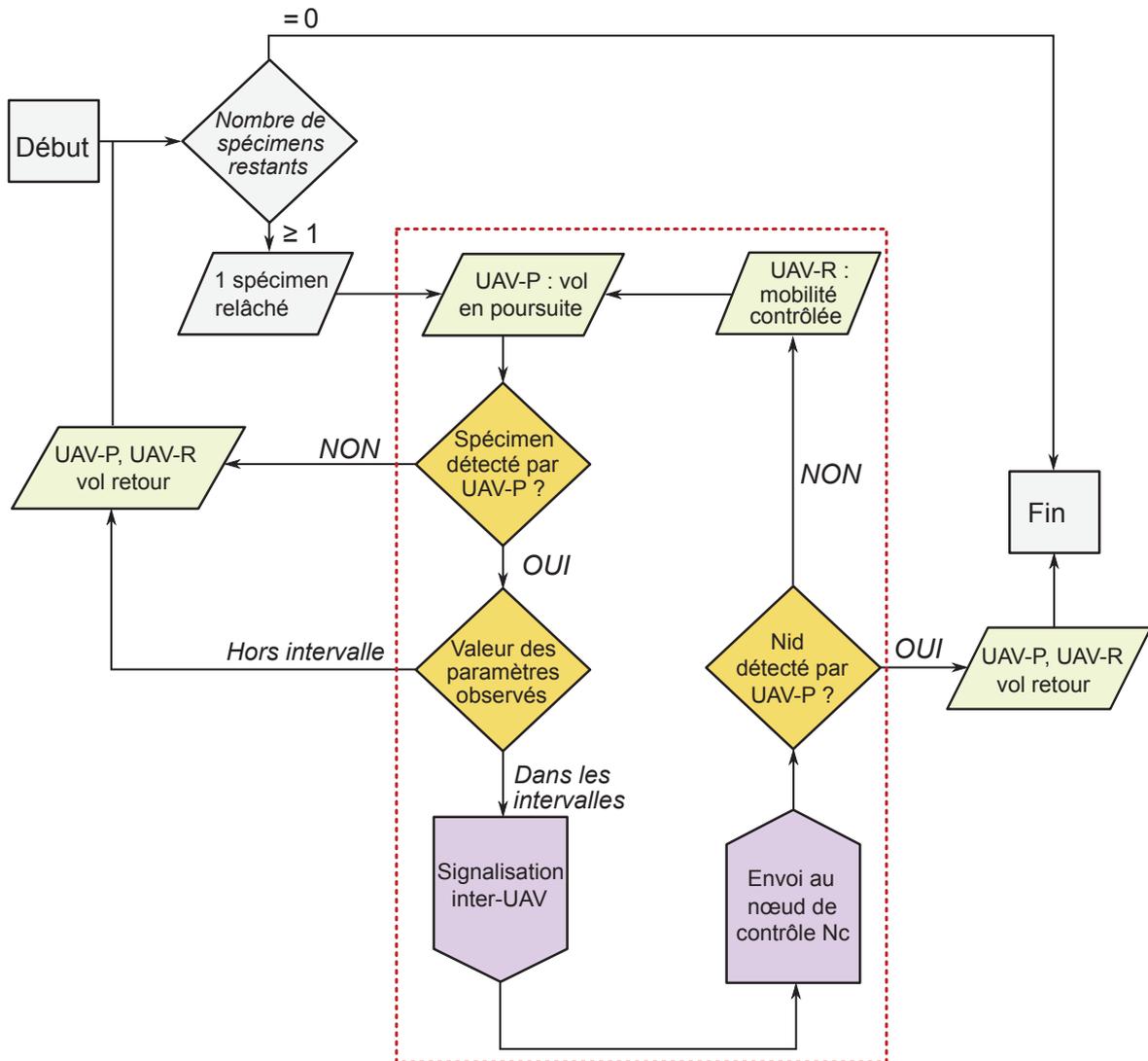


FIGURE 4.4 – Représentation du déroulé du scénario.

est concluant, les nœuds mobiles retournent à leur point de départ, atterrissent, puis le scénario se termine avec succès. Sinon, les procédures de mobilité contrôlée sont exécutées sur les nœuds-relais, et le bloc principal reboucle sur la procédure de vol en poursuite pour UAV-P.

4.3 Incidence des paramètres-clés de VFPS sur la performance réseau

4.3.1 Hypothèses de simulation

Dans le but d'évaluer la performance de notre stratégie de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles, nous avons réalisé un ensemble de simulations cohérentes avec le contexte du scénario de poursuite de frelons décrit dans la section 4.2. Dans cette optique, nous avons développé des codes de simulation pour le protocole VFPS, ainsi que les stratégies de mobilité des nœuds de type UAV-P, UAV-R et UAV-S au moyen du simulateur réseau ns-3, dans sa version 3.23. La Table 4.1 donne un résumé des valeurs des principaux paramètres de simulation. Ici, l'ensemble des 9 nœuds constituant le réseau (Nc, UAV-P ainsi que 7 nœuds de type initial UAV-S) sont dotés d'une interface réseau de type IEEE 802.11b/g et nous supposons dans notre contexte de simulation que les propagations radio s'effectuent sur les canaux de communication considérés suivant le modèle

Range Propagation Model [82]. Selon ce modèle, un signal transmis dans une zone de rayon $r_{portée}$ autour du nœud est reçu par ce dernier avec une puissance Rx égale à la puissance d'émission Tx du signal, sans prise en compte d'effets d'atténuation. En revanche, émis hors de cette zone, un signal est reçu avec une puissance $Rx = -1000$ dBm, c'est-à-dire qu'en pratique, il n'est pas reçu. On notera que dans la mesure où un certain nombre de paramètres-clés, qui seront définis au prochain paragraphe et que nous analyserons dans ce chapitre, dépendent de la portée de communication $r_{portée}$, pouvoir définir cette dernière précisément et simplement a motivé notre choix de modèle de propagation.

De plus, tous les nœuds sont initialement placés au centre $C(0,0,0)$ de la zone d'exploration. Au cours de chaque simulation, Nc garde une position stationnaire au point C , tandis qu'UAV-P possède un motif de mobilité de type modèle *RWP* le long de l'axe X des abscisses dans un intervalle $I_X = [-350 \text{ m}, 350 \text{ m}]$ à vitesse constante. Dans cette optique, il est intéressant de constater que ce motif de mobilité permet de modéliser, pour chaque simulation, une série de déplacements le long d'une trajectoire rectiligne, en direction de positions cibles T_X aléatoirement placées sur cette ligne et représentant un emplacement supposé d'un nid de *V. velutina*, en supposant que :

- T_X est uniformément distribué dans l'intervalle I_X ;
- La position d'UAV-P est ici considérée confondue avec celle du spécimen de frelon poursuivi.

En ce qui concerne la mobilité contrôlée des autres nœuds, VFPs est configuré de telle manière que chaque nœud exerce des forces virtuelles dont les valeurs des paramètres-clés d_r, d_f, d_a, I et Cx sont données dans la Table 4.1. En particulier, on peut souligner que la limite de zone attractive autour d'un nœud, matérialisée par la valeur du paramètre d_a , coïncide avec la valeur de portée radio $r_{portée}$ de l'interface réseau sans fil du nœud. De plus, on considère ici que les valeurs des paramètres de seuil Th_{dmax} et Th_{dmin} , utilisées pour déclencher l'insertion ou la suppression d'un nœud intermédiaire dans la chaîne de communication à sauts multiples reliant UAV-P et Nc , sont a priori comprises entre 0 et $r_{portée}$. Nous déterminerons cependant des plages de valeurs plus pertinentes dans la suite de ce chapitre. Il faut souligner, à ce propos, l'utilisation d'un protocole de routage *MANET*, et plus spécifiquement dans le cadre de ce chapitre, du protocole à états de liens optimisé (*OLSR*). De même, l'intensité de la force $f_{ra}(d)$ définie par (3.1) est telle que $I = 1 \text{ N}$. En outre, bien que les valeurs des paramètres d_f, I, Cx and Th_{dmax} soient fixées dans la Table 4.1, nous étudierons également dans les Sous-sections 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4 et 4.3.5 comment la performance de VFPs évolue lorsque différentes valeurs sont utilisées pour ces paramètres. Pour ce faire, nous définissons un flot *CBR* entre les nœuds UAV-P et Nc , et nous effectuons au moyen de simulations une série de mesures sur ce flot de données. Il faut noter à ce sujet que le choix de supposer un flot *CBR* se justifie par des observations préalables de données concrètement échangées entre des prototypes d'UAV de type quadricoptère et leurs stations de contrôle au sol (notamment en termes de messages de signalisation, de télémétrie et de flots vidéo). Le volume de ces échanges reste relativement régulier avec le temps, ce qui nous amène à considérer des débits d'échange constants par souci de simplification. De plus, nous allons considérer deux valeurs de débit *CBR* afin d'étudier la performance du protocole VFPs dans le contexte de faibles débits (illustrant par exemple l'échange de messages de contrôle et de données de télémétrie) et de débits plus importants (illustrant par exemple la diffusion d'un flot vidéo en qualité standard).

De surcroît, en termes de métriques de performance, nous utilisons les critères suivants :

- Le **taux de délivrance des paquets (PDR)** se rapporte ici à la mesure sur le flot *CBR*

TABLEAU 4.1 – Paramètres principaux de simulation

Paramètre	Valeur(s)	Définition
cd	{10 kbit/s, 100 kbit/s}	débit CBR
ctp	100 octets	taille d'un paquet CBR
Cx	2 si fixé	coefficient de frottement
d_a	100 m	limite de zone d'attraction
d_f	{50 m, 55 m, ..., 100 m}	limite de zone de frottement
d_r	50 m	limite de zone de répulsion
I	1 N si fixé	paramètre d'intensité
$L \times l$	1000 m x 1000 m	zone d'exploration
$r_{portée}$	100 m	portée radio
t	900 s	temps de simulation
Th_{dmin}	40 m si fixé	seuil de distance pour un retrait
Th_{dmax}	75 m si fixé	seuil de distance pour une insertion

émis par le nœud UAV-P et envoyé vers Nc. Tel que mesuré, ce **PDR** est défini comme le rapport entre le nombre de paquets **CBR** issus de UAV-P reçus par la destination Nc, et le nombre total de paquets **CBR** émis par la source UAV-P en direction de Nc.

- Le délai de bout-en-bout : ce délai se rapporte également à la mesure sur le flot **CBR** entre UAV-P et Nc. Il est calculé comme la différence entre le temps de réception par Nc au niveau de la couche application des paquets **CBR** issus de UAV-P et le temps d'émission de ces paquets par UAV-P, toujours au niveau de la couche application.
- La stabilité des chaînes de communication VFP : le nombre d'événements de type insertion ou retrait de nœuds intermédiaires dans une chaîne de communication est mesuré, et permet d'évaluer quelle est la stabilité dans le temps de la chaîne considérée. Ce critère donne ainsi des informations structurantes sur la capacité de la stratégie de mobilité contrôlée VFPs à remplir les objectifs de topologie réseau visés.
- La taille de l'ensemble des nœuds-relais non utilisés : puisque le nombre initial de nœuds supplémentaires UAV-S (qui, lorsqu'ils sont activés, sont utilisés comme nœuds-relais) est fixé, mesurer le nombre moyen de nœuds inutilisés donne un éclairage objectif sur l'efficacité avec laquelle VFPs utilise les nœuds relais pour atteindre les objectifs applicatifs prédéfinis. Cette taille de l'ensemble des UAV non utilisés est particulièrement importante, puisque pour un niveau de performance donné, en termes de **PDR** et de délai de bout-en-bout, il est souhaité que VFPs utilise aussi peu de nœuds que possible. En outre, ces nœuds inutilisés pourraient être employés à d'autres besoins applicatifs, ou pourraient mettre à profit les temps de veille pour recharger leurs batteries, pour un usage ultérieur en temps que futurs nœud-relais.

Pour finir, il faut noter que dans la suite de ce chapitre, chaque point des résultats de simulation affiché dans les Figs. 4.9-4.12 et Figs.4.16-4.20 est obtenu en réalisant la moyenne de 500 simulations indépendantes, chacune d'une durée individuelle de simulation de $t = 900$ s. De plus, ces résultats s'appuient sur une méthodologie commune en ce qui concerne les marges d'erreurs : l'ensemble des intervalles de confiance sont construits pour un niveau de confiance de 95% et les barres d'erreur sont affichées en conséquence pour toutes les figures mentionnées. On notera que les Figs. 4.6-4.8,4.14,4.15 représentent des simulations unitaires, et sont donc naturellement dénuées de barres d'erreur.

4.3.2 Impact des tailles relatives des zones d'interaction

En supposant que chaque nœud du réseau possède une interface de communication sans fil de même portée radio $r_{portée}$, nous avons cherché ici à évaluer comment la performance de VFPs évolue avec différentes tailles de zones d'interaction autour d'un nœud exerçant un ensemble de forces virtuelles sur son voisinage. Afin de simplifier l'analyse menée dans la suite de cette sous-section et plus généralement dans ce chapitre, nous avons cherché à ne manipuler qu'un unique paramètre relatif aux largeurs de zones d'interaction. Pour ce faire, nous avons d'abord fixé arbitrairement le rayon de la zone de répulsion s_r , et avons supposé que le rayon extérieur de la couronne circulaire représentant la surface d'attraction d'un nœud correspondrait à la portée radio de son interface de communication sans fil :

$$d_a = r_{portée} \quad (4.1)$$

Dans ce cadre, le rayon extérieur de la couronne circulaire représentant la zone de frottement, d_f (qui est aussi par construction le rayon intérieur de la couronne circulaire représentant la zone d'attraction) peut varier dans un intervalle $[d_r, r_{portée}]$, c'est-à-dire, selon les valorisations données dans la Table 4.1, dans un intervalle [50 m, 100 m]. Plus précisément, dans la suite du chapitre, nous choisissons selon les cas à analyser une ou plusieurs valeurs pour d_f dans l'ensemble fini $\{50, 55, \dots, 100\}$. Ces valeurs permettent en effet d'étudier, à taille de zone de répulsion et rayon de couronne circulaire d'attraction constants, différentes répartitions des tailles des zones de frottement et d'attraction, en incluant les cas extrêmes d'absence de zone de frottement ou de zone d'attraction. En effet, comme illustré dans la Fig. 4.5, le cas $d_f = d_r = 50$ m implique l'absence d'une zone de frottement autour du nœud considéré, tandis que le cas $d_f = r_{portée} = 100$ m résulte en l'absence de zone d'attraction. Le cas $d_r < d_f < r_{portée}$ donne quant à lui une répartition plus équilibrée en termes de taille de zone de frottement et de zone d'attraction. La suite de cette sous-section permet d'analyser les conséquences de la valorisation de d_f sur la topologie réseau attendue, sur le taux de délivrances et les délais de bout-en-bout associés aux paquets CBR échangés entre l'UAV de poursuite UAV-P et le nœud de contrôle Nc.

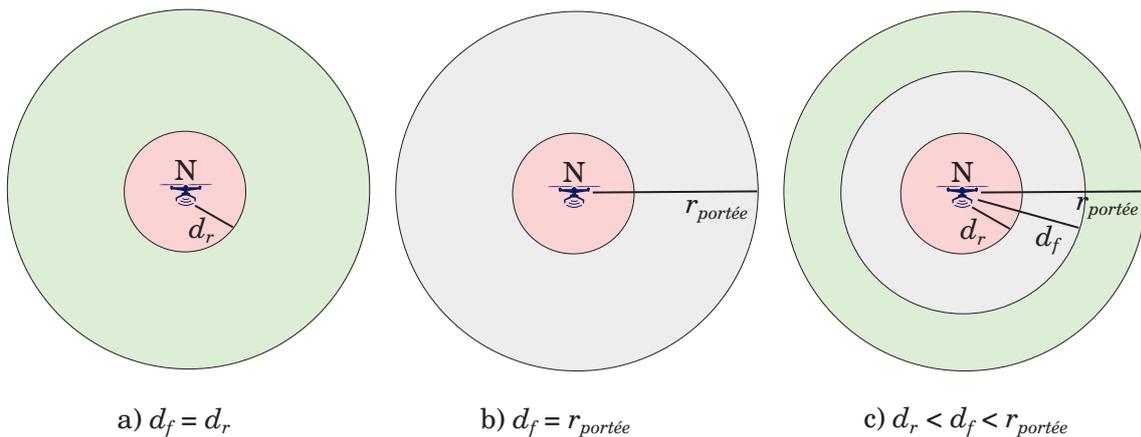


FIGURE 4.5 – Différents cas de valorisation de d_f ont un impact sur la répartition des zones de frottement (en gris) et d'attraction (en vert). La zone de répulsion (en rouge) est supposée fixée.

Impact sur la topologie attendue

Afin d'illustrer concrètement l'impact des tailles relatives des zones d'interactions sur la topologie attendue, nous donnons ici un exemple de placement des nœuds, pour

trois valeurs d'exemple de d_f . Ces exemples illustrent trois situations typiques dans lesquelles les zones de répulsion, de frottement et d'attraction ne sont pas réparties de la même manière, et correspondent à des cas proches de ceux représentés dans la Fig. 4.5. Nous considérons en effet $d_f \in \{50, 75, 90\}$ et montrons avec les Fig. 4.6-4.8, pour chacune de ces trois valeurs d'exemple, les résultats en termes de placement des nœuds sur l'axe des abscisses de simulations représentatives. On note que dans les trois simulations considérées, le nœud de poursuite possède la même trajectoire.

Dans ce contexte de mobilité, nous observons comment les nœuds-relais sont insérés dans une chaîne de communication, et comment ces derniers suivent le nœud de poursuite afin de maintenir la route à saut multiples entre le nœud de contrôle et le nœud de poursuite. La Fig. 4.6, qui illustre le cas où $d_f = 50$ m, correspond à une absence de zone de frottements autour des nœuds, comme précédemment montré dans la Fig. 4.5 (a). Dans cette situation, l'absence de frottements provoque des oscillations indésirables à partir du moment où les nœuds-relais qui exerçaient une force virtuelle attractive (respectivement répulsive) sur leur successeurs respectifs en viennent à exercer une force répulsive (respectivement attractive). On peut notamment vérifier dans la Fig. 4.6 que des oscillations apparaissent suite au premier changement de direction du nœud de poursuite, vers $t = 75$ s. Ces effets d'oscillations empêchent la formation correcte de la topologie désirée. On peut d'ailleurs observer, durant cette simulation d'exemple, plusieurs moments pendant lesquels les ordres logiques dans la chaîne de communication établie ne correspondent pas à la position géographique des nœuds.

A l'opposé, la Fig. 4.7 illustre cette fois-ci, avec $d_f = 90$ m, un cas proche de celui qui avait été montré dans la Fig. 4.5 (b). Ici, la zone d'attraction est fortement rétrécie, ce qui impacte négativement la capacité des nœuds-relais et de poursuite d'attirer leurs successeurs dans la chaîne. Le résultat d'exemple confirme ce comportement, puisque les chaînes sont très peu souvent correctement formées, et il existe peu de moments pendant la simulation où une route à sauts multiples est correctement établie entre le nœud de poursuite et le nœud de contrôle, qui reste immobile à $x = 0$, conformément aux hypothèses de simulations.

Enfin, la Fig. 4.8, avec $d_f = 75$ m, montre le cas de zones de répulsion, de frottement et d'attraction réparties de manière équilibrée, comme précédemment illustré dans la Fig. 4.5 (c). Dans cet exemple, les chaînes de communication sont efficacement formées et maintenues, et on vérifie au passage que les nœuds-relais sont correctement retirés de la chaîne lorsqu'ils ne sont plus utiles.

Performance réseau pour des flux utilisateurs à bas débit

Les Figs. 4.9-4.10 illustrent les résultats de simulation relatifs au PDR et au délai de bout-en-bout en fonction de d_f , pour $d_f \in \{50, 55, \dots, 100\}$. Ces résultats sont obtenus pour des débits CBR de 10 kbit/s.

PDR Il est d'abord intéressant de souligner que la courbe de PDR croit d'abord avec d_f pour atteindre un maximum légèrement supérieur à 80% pour des valeurs de d_f de 75 et 80 m. Au delà de ces valeurs, le PDR décroît fortement. Pour $d_f = 50$ m, un PDR de l'ordre de 60% est atteint. Deux raisons expliquent ce résultat : premièrement, comme illustré précédemment dans la Fig. 4.5, cette valeur minimale de d_f sous-tend l'absence d'une zone de frottement, et donc d'une zone dans laquelle les nœuds voisins sous influence de ce système de forces auraient pu se stabiliser. En conséquence, de nombreuses instabilités de positions des nœuds intermédiaires dans la chaîne de communication considérée sont observées et vont elles-mêmes entraîner un accroissement des pertes de paquets et une diminution significative du PDR. Deuxièmement, pour cette valeur minimale de d_f , le

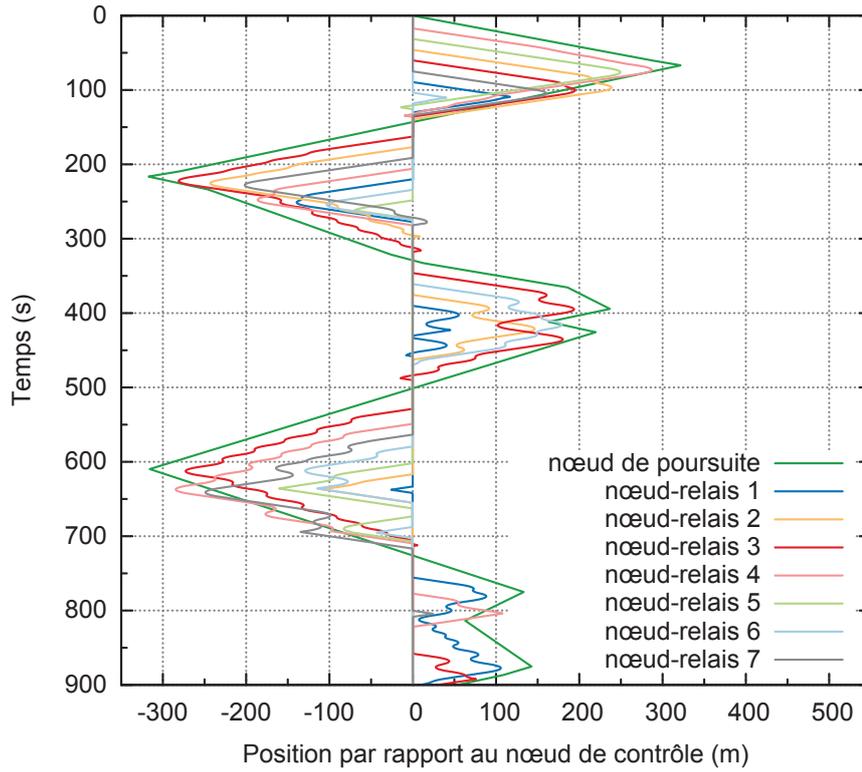


FIGURE 4.6 – Position sur l’axe des abscisses des nœuds-relais et de poursuite. On suppose ici $d_f = 50$ m, la zone de frottement est donc inexistante.

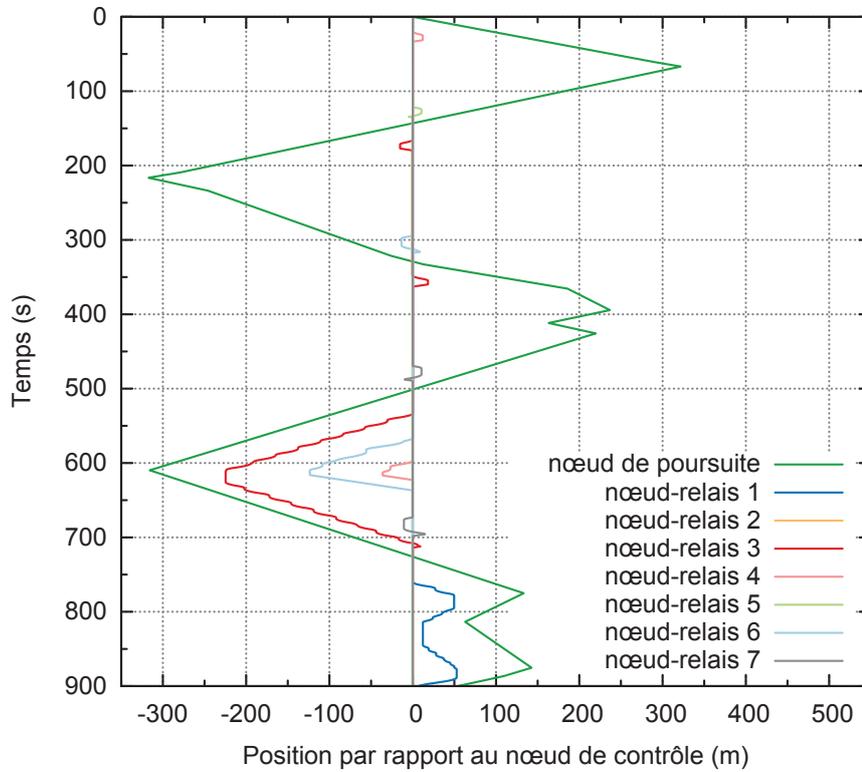


FIGURE 4.7 – Position sur l’axe des abscisses des nœuds-relais et de poursuite. On suppose ici $d_f = 90$ m, la zone d’attraction est donc relativement étroite.

rayon intérieur de la couronne circulaire représentant la zone d'attraction est également minimal. De fait, la distance moyenne entre les nœuds intermédiaires d'une chaîne de communication aura tendance à diminuer, ce qui nécessitera à distance constante entre nœuds source et destination plus de sauts pour construire cette chaîne, et au final une probabilité de perte de paquets CBR accrue.

De même, de $d_f = 80$ jusqu'au bout de l'intervalle considéré, le PDR diminue fortement jusqu'à atteindre une valeur minimale d'environ 30%. L'obtention de ce minimum peut être aisément expliqué, puisque comme également rappelé dans la Fig. 4.5, une valeur $d_f = 100$ m entraîne une absence de zone d'attraction, et dans ce cas extrême, les nœuds exerçant des forces virtuelles dans leur entourage ne peuvent plus attirer leurs voisins. En conséquence, avec cette valeur de d_f , le protocole VFPs ne peut plus correctement amener les nœuds intermédiaires à s'insérer dans les chaînes, qui une fois formées ne dépassent pas ici un saut. Autrement dit, N_c ne reçoit dans ce cas les paquets CBR issus de UAV-P que lorsque ce dernier est en portée de communication sans fil directe avec N_c , amenant à la valeur de PDR observée pour $d_f = 100$ m.

Délai de bout-en-bout En complément des résultats de PDR précédemment présentés, la Fig. 4.10 donne une représentation des délais de bout-en-bout, obtenus avec un débit CBR de 10 kbit/s entre UAV-P et N_c . Pour les raisons précédemment données sur la relation entre la valeur de d_f et la distance moyenne entre les nœuds intermédiaires d'une chaîne de communication, le délai est inversement proportionnel au nombre de sauts moyens de la chaîne. Dans ce contexte, le délai le plus important est ainsi observé pour $d_f = 50$ m, avec environ 1,3 ms tandis que le délai le plus faible, de l'ordre de 0,5 ms, est obtenu pour $d_f = 100$ m. Dans tous les cas, le délai reste très faible et ces résultats relatifs aux délais ne remettent pas en question l'analyse de l'intervalle de valeur de d_f le plus adapté (c'est-à-dire d_f compris entre 75 et 80 m) précédemment effectuée sur la base des

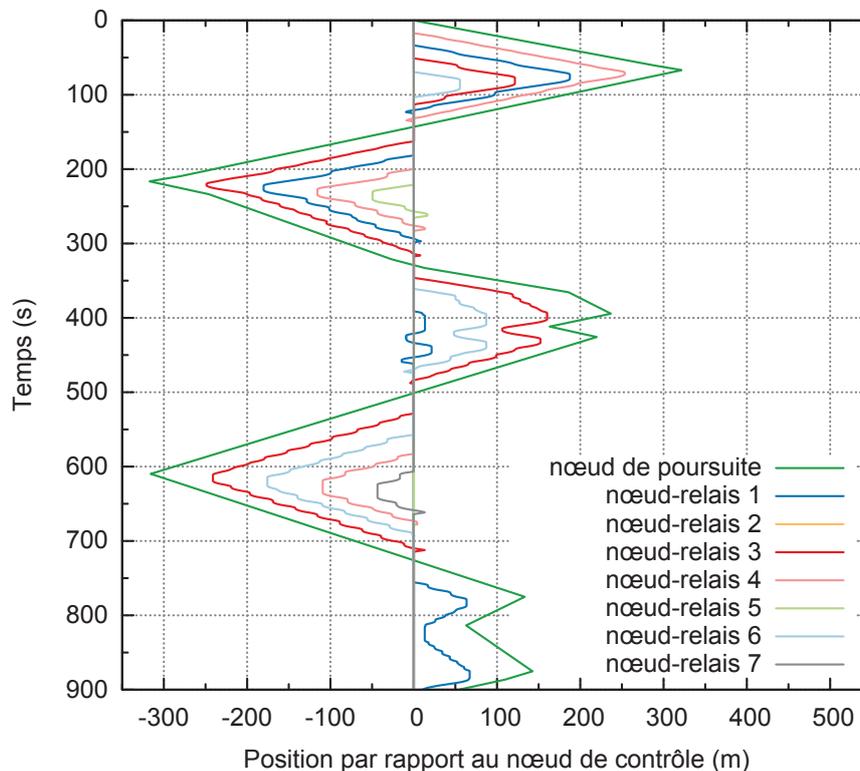


FIGURE 4.8 – Position sur l'axe des abscisses des nœuds-relais et de poursuite. On suppose ici $d_f = 75$ m.

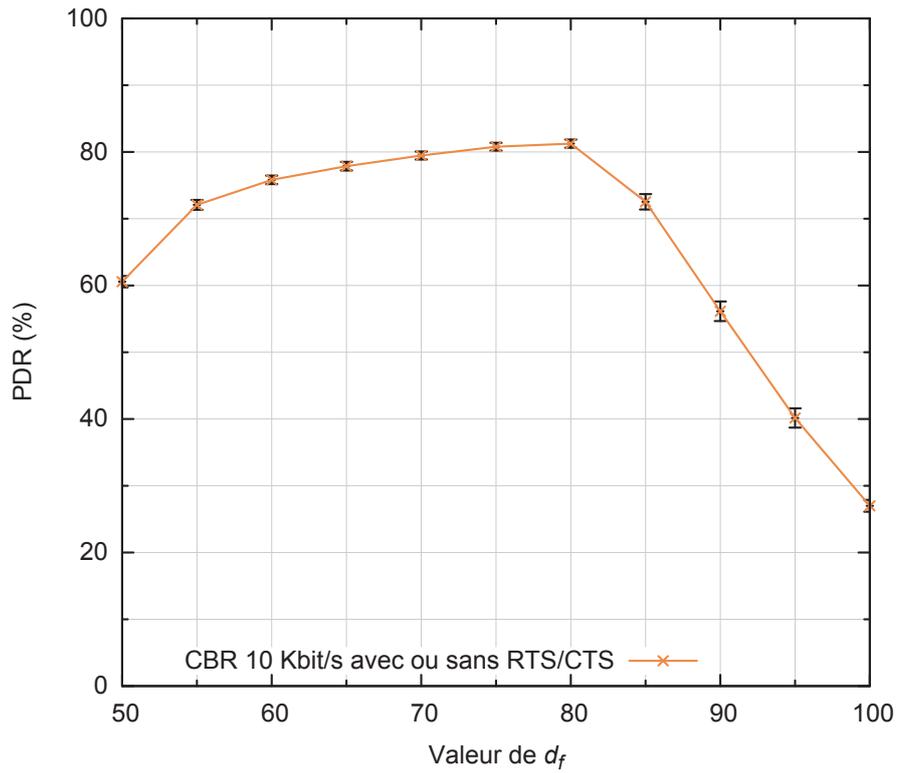


FIGURE 4.9 – PDR relatif aux paquets CBR issus d’UAV-P et reçus par Nc, selon d_f , pour un débit de 10 kbit/s, avec ou sans activation optionnelle de mécanismes de contrôle de flux (RTS/CTS) [83].

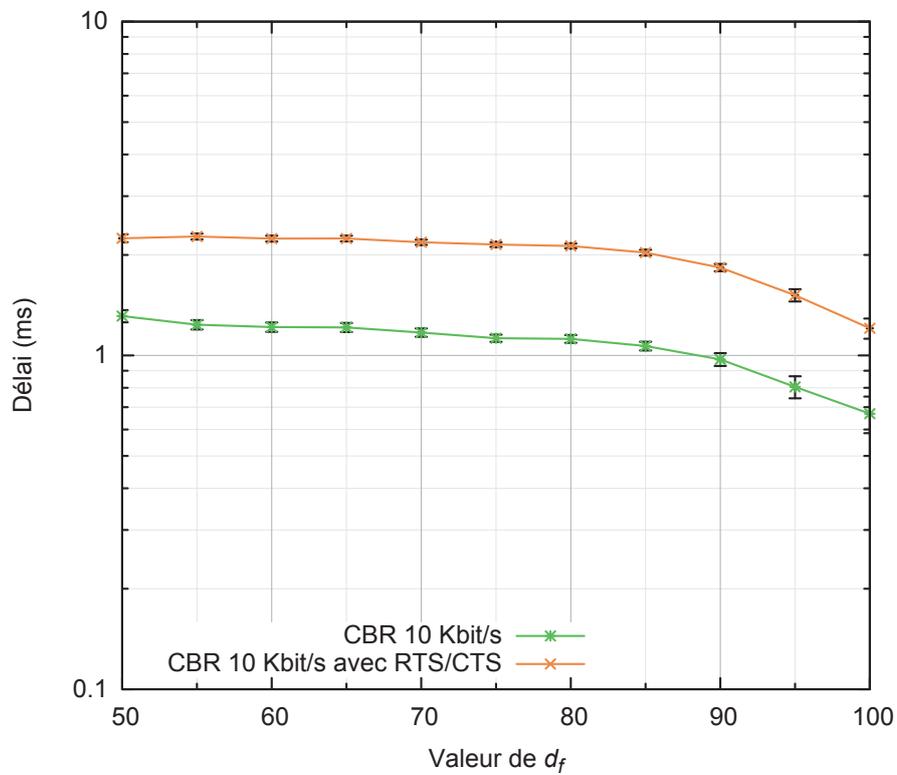


FIGURE 4.10 – Délai de bout-en-bout relatif aux paquets CBR issus d’UAV-P et reçus par Nc, selon d_f , pour un débit de 10 kbit/s, avec ou sans activation optionnelle de RTS/CTS.

résultats de **PDR**.

Utilisation de RTS/CTS Il est intéressant de noter que nous avons, de manière incidente, cherché à évaluer l'utilisation du mécanisme **RTS/CTS**, dont l'objectif est, dans le contexte de la norme **IEEE 802.11**, d'atténuer l'impact des effets des collisions de paquets provoquées par le problème des stations cachées [83]. Les résultats des simulations utilisant **RTS/CTS** ne diffèrent significativement pas des résultats précédents en ce qui concerne le **PDR**. Cependant, les délais de bout-en-bout sont eux approximativement doublés pour toutes les valeurs considérées de d_f . Bien que ces délais, qui restent toujours inférieurs à 2,5 ms, sont toujours très faibles et donc compatibles avec une grande majorité de perspectives applicatives, il faut cependant souligner l'effet contre-productif de l'utilisation de **RTS/CTS** dans le contexte de notre scénario de simulation, ce qui explique notre choix de ne pas prendre en compte ce mécanisme dans le reste des simulations analysées dans la suite de ce chapitre et des chapitres suivants.

Conséquences de l'augmentation du débit des flux utilisateurs

PDR et délai de bout-en-bout Dans l'hypothèse où le réseau doit acheminer des flots de données utilisateur avec des débits plus importants, comme par exemple dans le cas de l'envoi par UAV-P vers Nc de paquets d'une transmission vidéo en temps réel, nous avons cherché à analyser comment évoluaient les résultats précédents. Pour ce faire, nous avons augmenté la valeur du débit cd du flot **CBR** de 10 à 100 kbit/s et laissé inchangées les valeurs des autres paramètres de simulation. Les Fig. 4.11-4.12 donnent une représentation des **PDR** et délais obtenus pour cette valeur de débit **CBR**. Dans l'ensemble des valeurs de d_f considérées, il apparaît clairement que le **PDR** s'effondre vers 30 à 40%, tandis que le délai de bout-en-bout augmente fortement, entre 85 et 125 ms, ce qui semble obérer les perspectives de support de débits plus importants pour des flux utilisateurs peu tolérants aux pertes de paquets et aux délais.

Une analyse plus détaillée des traces de simulations révèle, dans ce cas où le débit **CBR** atteint 100 kbit/s, un retard important pouvant être pris par les paquets devant être émis en *broadcast* alors que des trames émises en *unicast* sont en cours de retransmission. De plus, nous avons pu vérifier que dans ce cas, la plupart des retransmissions sont causées par des paires de nœuds s'éloignant mutuellement, à cause de leurs motifs de mobilité, au-delà de leurs portées respectives de transmission sans-fil. En conséquence, les trames non acquittées sont ici susceptibles de rester non acquittées et vont dans ce cas provoquer un nombre maximal de retransmissions. Afin de caractériser plus précisément le problème observé, nous prenons l'exemple de l'analyse du trafic observé pour une des 500 simulations utilisées pour obtenir les résultats synthétiques des Fig. 4.11-4.12. Cette simulation est choisie de manière à être représentative des problèmes de retransmissions et de délais observés. L'analyse du trafic, qui est rendue possible par l'élaboration, lors de la simulation, d'un fichier de traces de capture de paquets (**PCAP**) capturant l'ensemble des trames transmises, montre des latences significatives sur les paquets émis en *broadcast*, et en particulier sur les paquets relatifs aux messages Balise. Dans le contexte de cette investigation, il est intéressant de noter les deux considérations suivantes :

- Lorsqu'elles sont émises sur une interface de communication **IEEE 802.11**, les trames des paquets envoyées en *broadcast* ne sont pas acquittées ni retransmises. En conséquence, seul le flot de communication **CBR unicast** entre les nœuds de poursuite et de contrôle est une source potentielle de retransmissions au niveau **contrôle d'accès au support (MAC)**.
- Dans nos simulations ns-3, sauf mention contraire, les mécanismes de retransmissions **MAC** sont configurés par défaut, c'est-à-dire qu'une trame transmise mais non

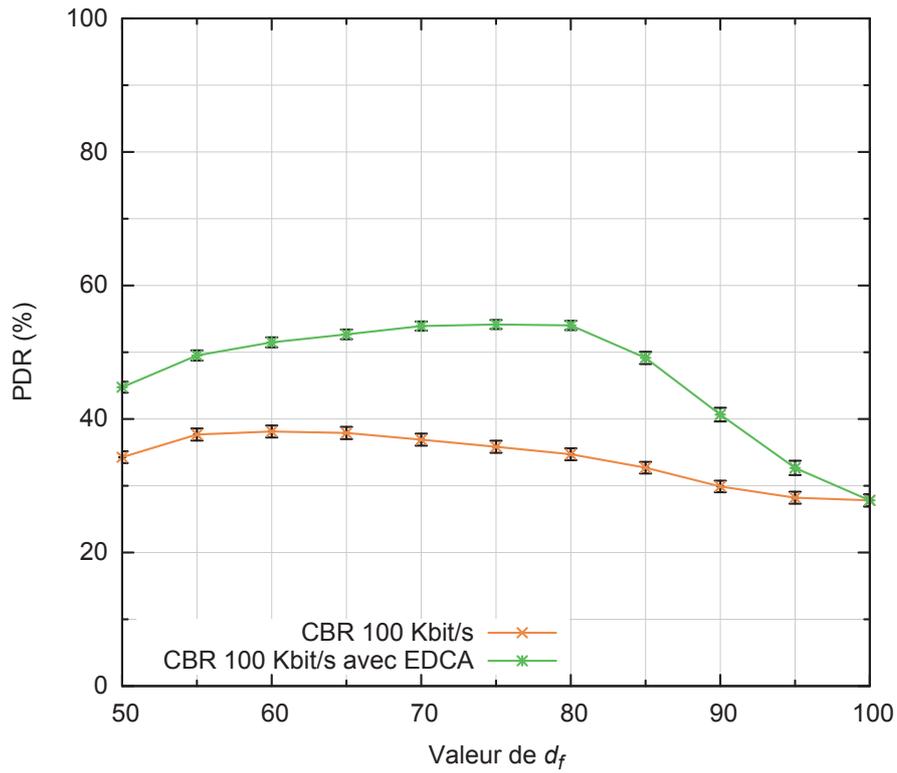


FIGURE 4.11 – PDR relatif aux paquets CBR issus d’UAV-P et reçus par Nc, selon d_f , pour un débit de 100 kbit/s, avec ou sans activation optionnelle de IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) [84].

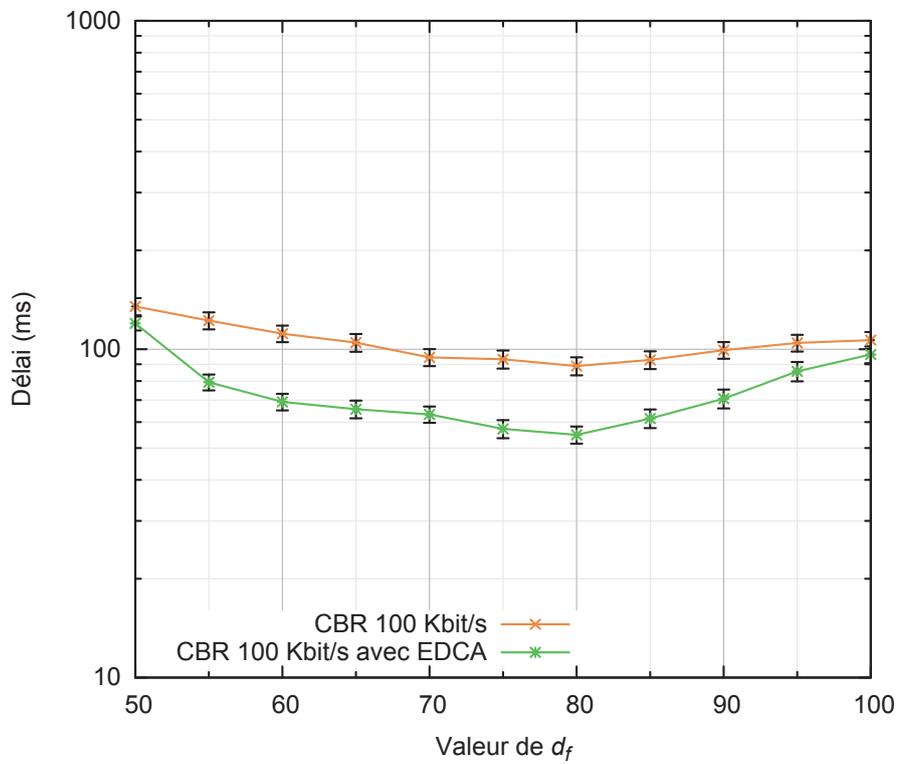


FIGURE 4.12 – Délai de bout-en-bout relatif aux paquets CBR issus d’UAV-P et reçus par Nc, selon d_f , pour un débit de 100 kbit/s, avec ou sans activation optionnelle de IEEE 802.11e EDCA.

acquittée par la destination est retransmise jusqu'à 6 fois.

Par la suite, la Fig. 4.13 illustre un extrait des traces de captures mentionnées, sous la forme d'une liste de 15 trames, numérotées de 4958 à 4972, comme il est possible de le voir dans la première colonne de la partie haute de la figure. Ces 15 trames représentent un envoi de 3 paquets, détaillé de la manière suivante :

1. Un paquet **CBR unicast** de 100 octets encapsulé dans la trame 4958 de 164 octets, est envoyé par le nœud de poursuite vers le nœud de contrôle. Cette trame, qui est émise pour la première fois, n'est pas fragmentée. Le nœud de contrôle ne l'acquittant pas, celle-ci est réémise par le nœud de poursuite 6 fois, dans les trames 4959 à 4964. Au final, 7 trames sont ici émises pour tenter de transmettre le paquet **CBR** considéré, mais le nœud de contrôle ne reçoit pas ce paquet.
2. Un paquet relatif à un message Balise, de 36 octets, est encapsulé dans la trame 4965 de 100 octets puis est envoyé par le nœud de poursuite vers le nœud de contrôle. Cette trame, émise en *broadcast*, donc sans demande d'acquittement de la part de la destination, n'est pas fragmentée.
3. Un nouveau paquet **CBR unicast** est encapsulé dans la trame 4966 puis émis par le nœud de poursuite. Le paquet est retransmis 6 fois, sans que le nœud de contrôle n'acquitte aucune des trames. Le paquet correspondant est donc perdu.

Au total, sur ces 15 trames, il est important de souligner qu'aucune des 14 trames envoyées en *unicast* n'est reçue par le nœud de contrôle, et les 2 paquets **CBR** correspondants sont

No.	Sim Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4958	00:00:23.385544	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4959	00:00:23.386666	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4960	00:00:23.388508	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4961	00:00:23.390850	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4962	00:00:23.392952	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4963	00:00:23.400694	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4964	00:00:23.405576	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4965	00:00:23.406478	10.1.1.2	10.1.1.255	UDP	100	Source port: 49153 Destination port: 7081
4966	00:00:23.407580	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4967	00:00:23.408502	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4968	00:00:23.410464	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4969	00:00:23.411646	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4970	00:00:23.414648	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4971	00:00:23.415950	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082
4972	00:00:23.421392	10.1.1.2	10.1.1.1	UDP	164	Source port: 49154 Destination port: 7082


```

> Frame 4965: 100 bytes on wire (800 bits), 100 bytes captured (800 bits)
  IEEE 802.11 Data, Flags: 0.....
    Type/Subtype: Data (0x20)
    Frame Control: 0x8008 (Normal)
      Version: 0
      Type: Data frame (2)
      Subtype: 0
      Flags: 0x80
        .... ..00 = DS status: Not leaving DS or network is operating in AD-HOC mode (To DS: 0 From DS: 0) (0x00)
        .... .0.. = More Fragments: This is the last fragment
        .... 0... = Retry: Frame is not being retransmitted
        ...0 .... = PWR MGT: STA will stay up
        ..0. .... = More Data: No data buffered
        .0.. .... = Protected flag: Data is not protected
        1... .... = Order flag: Strictly ordered
      Duration: 0
      Destination address: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
      Source address: 00:00:00_00:00:02 (00:00:00:00:00:02)
      BSS Id: 00:00:00_00:00:02 (00:00:00:00:00:02)
      Fragment number: 0
      Sequence number: 2126
    Logical-Link Control
    Internet Protocol Version 4, Src: 10.1.1.2 (10.1.1.2), Dst: 10.1.1.255 (10.1.1.255)
    User Datagram Protocol, Src Port: 49153 (49153), Dst Port: 7081 (7081)
    Data (36 bytes)
  
```

FIGURE 4.13 – Extrait de capture PCAP de l'interface du nœud de poursuite, configurée en mode promis-cuité.

considérés comme perdus. Les retransmissions correspondantes sont en conséquence coûteuses en ressources sur le médium partagé, et en particulier dans le cadre de notre scénario de simulation. En effet, la plupart des causes de non acquittement sont expliquées par la mobilité physique des nœuds, et ici au fait que dans les temps considérés, la distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur a dépassé le seuil $r_{portée}$, sans que le protocole de routage sous-jacent n'ait pu encore détecter que le lien correspondant était perdu. De plus, une analyse plus fine des traces révèle que pour l'émission d'un paquet CBR de 100 octets à 100 kb/s, seule la partie de la trame correspondant à la charge utile IP, de 164 octets, est envoyée au débit du lien (c'est-à-dire, dans notre configuration, 11 Mb/s), pour un envoi de 120 μ s. En revanche, suite à cet envoi, le médium est occupé pour une durée plus importante, incluant 192 μ s d'envoi à 1 Mb/s des données de préambule et d'entête de la trame, et 340 μ s réservés pour l'attente d'un acquittement positif à cette trame. Cet exemple étant représentatif des problèmes observés dans ce scénario pour le débit applicatif considéré, on peut souligner que de ce point de vue, la configuration de la taille des paquets CBR entre les nœuds de poursuite et de contrôle n'est pas judicieux si les retransmissions surviennent souvent, comme c'est le cas ici. De plus, ces retransmissions inutiles ont un impact néfaste sur les délais relatifs aux files d'attente pour les paquets devant être émis en *broadcast* (messages Balise tels que définis dans le chapitre précédent y compris). Cet impact peut se matérialiser, selon nos observations, par des délais pouvant atteindre jusqu'à plusieurs secondes dans les cas les plus défavorables. À cause de ces délais, les nœuds vont ici recevoir des informations obsolètes issues des messages Balise de leurs voisins, ce qui peut provoquer une estimation erronée de la position des nœuds voisins, avec des erreurs de l'ordre de 10 à 15 m dans nos scénarios de simulation. Par conséquent, cette erreur peut elle-même occasionner des placements des nœuds erronés et in fine la formation de topologies réseau inadaptées. À titre d'exemple, les Fig. 4.14-4.15 montrent les résultats, en termes de placement des nœuds sur l'axe des abscisses, de deux simulations utilisant respectivement un débit CBR de 10 kb/s et de 100 kb/s. Dans le premier cas, les nœuds-relais se déplacent correctement sous l'influence des forces virtuelles, afin de former la chaîne de communication à sauts multiples entre le nœud de contrôle (situé à la position $x = 0$) et le nœud de poursuite. En revanche, dans le second cas, qui correspond à la simulation d'exemple dont nous venons d'analyser un extrait de 15 trames, la topologie réseau obtenue est telle que les chaînes de communication à sauts multiples sont peu souvent formées, et représente une cause majeure de chute du PDR d'augmentation des délais de bout-en-bout, comme on l'observe dans les Fig. 4.11-4.12.

Approches correctives Dans ce cas où une moindre performance est constatée, nous avons cherché à étudier le comportement du réseau lorsque diverses actions correctives sont appliquées, celles-ci suivant deux approches générales distinctes :

- Nous avons d'abord fixé le nombre maximum de retransmissions des trames MAC à zéro, et avons ainsi pu vérifier que la performance du réseau était ramenée à celle observée en cas de faible débit CBR, tel que $cd = 10$ kbit/s, c'est-à-dire avec des résultats similaires en termes de PDR ou de délai de bout-en-bout. En particulier, les résultats de la simulation d'exemple illustrée par la Fig. 4.14 restent identiques lorsque le débit CBR passe de $cd = 10$ kbit/s à $cd = 100$ kbit/s avec le nombre maximum de retransmissions des trames MAC à zéro.
- Dans un contexte plus réaliste de déploiement, les retransmissions de trames *unicast* sont habituellement utiles et doivent être activées. Dans cette perspective, une approche alternative de réduction des délais en file d'attente pour les paquets émis en *broadcast* est de s'appuyer sur des mécanismes de priorisation de flots. Afin d'illus-

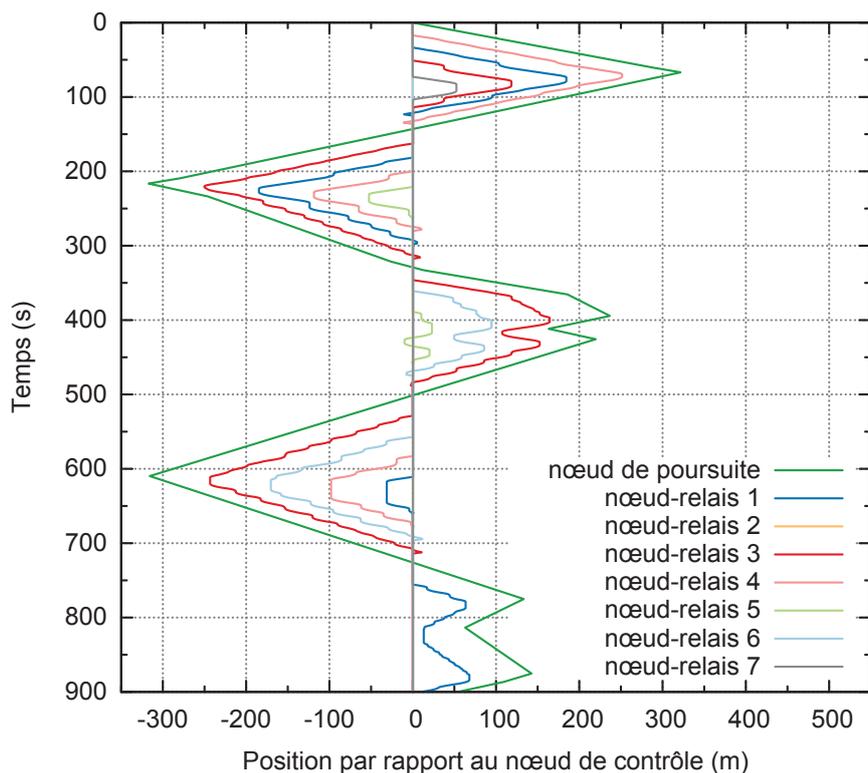


FIGURE 4.14 – Position sur l’axe des abscisses des nœuds-relais et de poursuite. Les débits CBR sont tels que $cd = 10$ kb/s.

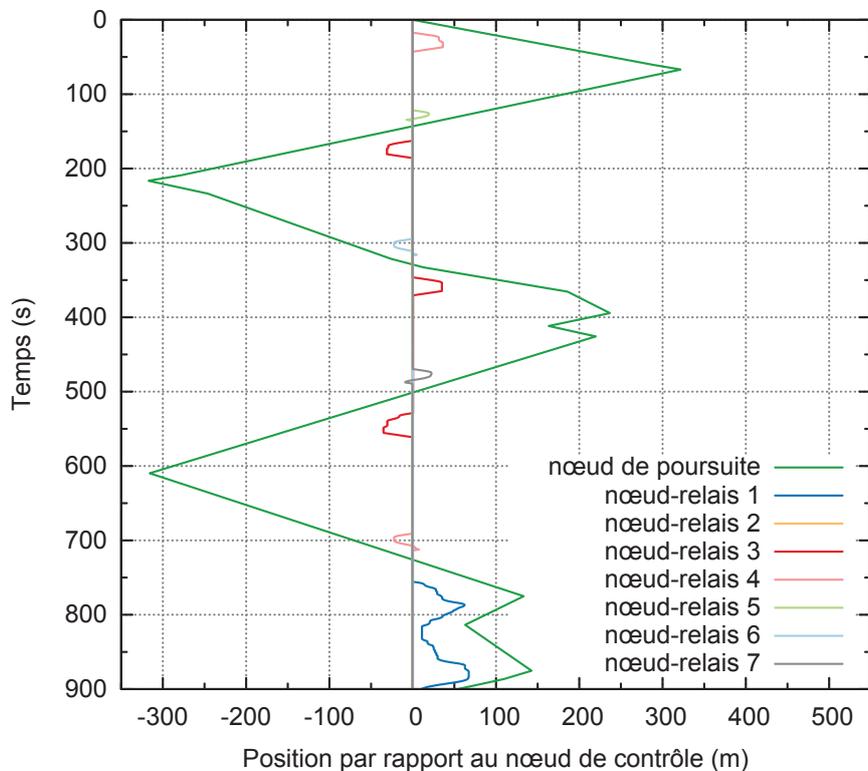


FIGURE 4.15 – Position sur l’axe des abscisses des nœuds-relais et de poursuite. Les débits CBR sont tels que $cd = 100$ kb/s.

trer cette approche, nous avons donc étudié l'utilisation de 4 classes d'accès IEEE 802.11e EDCA [84]. Plus précisément, nous avons marqué les paquets envoyés en *broadcast* correspondant aux messages Balise avec une classe d'accès à priorité élevée, *AC_VO*, alors que le reste du trafic restait associé avec la classe d'accès par défaut *AC_BE*, dite *best effort*. Comme représenté par les Fig. 4.11-4.12, avec la priorisation des messages Balise, le PDR et le délai de bout-en-bout atteignent respectivement environ 55% et 55 à 60 ms lorsque d_f se trouve dans l'intervalle 75-80 m. Ainsi, la faculté du réseau à transmettre des flots utilisateurs avec des débits de 100 kbit/s est significativement améliorée, bien que la performance obtenue dans ce cas reste inférieure à celle obtenue lorsque les retransmissions de trames MAC sont désactivées.

Tout en gardant ces résultats en tête, il est intéressant de souligner que la performance obtenue par un tel réseau constitué de nœuds mettant en œuvre VFPs dépend également de facteurs externes. Pour commencer, il existe une marge d'amélioration en ce qui concerne le choix d'un protocole de routage MANET permettant une maintenance rapide et efficace d'une route à sauts multiples lorsque des perturbations ou des dysfonctionnements surviennent sur les liens de communications. De même, une solution de routage parfaitement adaptée pourrait bénéficier plus largement de mécanismes de notifications, en particulier issues de la couche liaison [85, 86], que nous n'avons pas pris en compte dans nos simulations. De plus, la taille *ctp* d'un paquet CBR tel qu'échangé entre les nœuds UAV-P et Nc, c'est-à-dire 100 octets, pourrait être augmentée dans un scénario de déploiement concret pour éviter que les entêtes des paquets prennent une place excessive en regard de la charge utile de ces mêmes paquets. Cet aspect pourrait ainsi représenter une autre approche d'optimisation externe au protocole VFPs, en particulier en cas de débits utilisateurs plus importants.

En conséquence, on peut s'attendre à ce qu'au delà du contexte de notre scénario de simulation, le support efficace de débits accrus dépende fortement de l'utilisation de mécanismes indépendants de VFPs, comme par exemple la mise en œuvre d'un protocole de routage offrant un retour d'information rapide de la couche MAC, l'emploi de liens de communication de plus grande capacité, ainsi que le support de techniques de priorisation de paquets. Pour cette raison, en ce qui concerne l'analyse de la performance spécifique de VFPs, nous continuerons à nous concentrer, dans la suite de ce chapitre, sur le cas de flux utilisateurs avec un débit de $cd = 10$ kbit/s, en soulignant que le support efficace de débits plus élevés peut être obtenu au moyen de mécanismes externes à VFPs, en particulier ceux mentionnés précédemment.

4.3.3 Impact du paramètre I d'intensité de force d'attraction/répulsion

Dans les simulations précédentes, nous avons fixé le paramètre I , relatif à l'intensité des forces virtuelles d'attraction-répulsion et tel que défini dans (3.1), à une valeur arbitraire $I = 1$ N. Nous cherchons maintenant à évaluer l'impact de la variation de I sur la performance générale d'un réseau dont les nœuds mobiles mettent en œuvre le protocole VFPs. Pour ce faire, nous avons une fois de plus étudié l'évolution du PDR et du délai de bout-en-bout tels que définis précédemment, tout en faisant varier cette fois-ci le paramètre I , comme illustré par la Fig. 4.16, dans laquelle plusieurs courbes de PDR sont représentées pour des valeurs de I comprises entre 0.125 N et 8 N. Le cas $I = 1$ N, qui a ainsi été étudié dans la sous-section précédente, est utilisé en tant que base de comparaison.

PDR

Ces résultats soulignent tout d'abord que les valeurs optimales pour d_f , en termes de PDR, varient avec I . De plus, on peut observer que ces valeurs optimales pour d_f décroissent lorsque I décroît lui-même de 1 N à 0.125 N (et pour toutes les valeurs comprises entre 0.125 N et 0, bien que ces valeurs ne soient pas représentées dans la Fig. 4.16 par souci de lisibilité). Dans cet intervalle de valeurs pour I , les meilleurs résultats relatifs au PDR sont donc obtenus pour $I = 1$ N, pour lesquels les meilleures valeurs de d_f se trouvent dans l'intervalle [75 m, 80 m] comme mentionné dans les simulations précédentes. En revanche, lorsque I est plus grand que 1 N, la performance observée atteint un plafond et les courbes de PDR sont pratiquement identiques pour toute valeur de I supérieure à 8 N (que l'on ne représente pas non plus par souci de lisibilité). Il est intéressant de souligner que l'intervalle de valeurs acceptables pour d_f se déplace vers des valeurs plus élevées lorsque I augmente. Ceci pourrait être interprété comme un avantage, puisqu'une valeur plus importante de d_f va typiquement provoquer la formation de topologies réseaux où les nœuds intermédiaires voisins d'une chaîne de communication VFP sont plus éloignés les uns des autres. Cependant, en pratique, I est limité dans un scénario de déploiement réel par les accélérations et vitesses maximales supportées par les UAV considérés [87].

Délai de bout-en-bout

Les délais de bout-en-bout mesurés pour le même ensemble de valeurs de I sont tels que dans tous les cas, les paquets CBR issus d'UAV-P sont reçus par Nc dans un délai maximum de 2 ms, pour toute valeur du couple (d_f, I) . En conséquence, ce critère de performance ne remet pas en question les observations précédentes effectuées sur la base de la métrique de PDR.

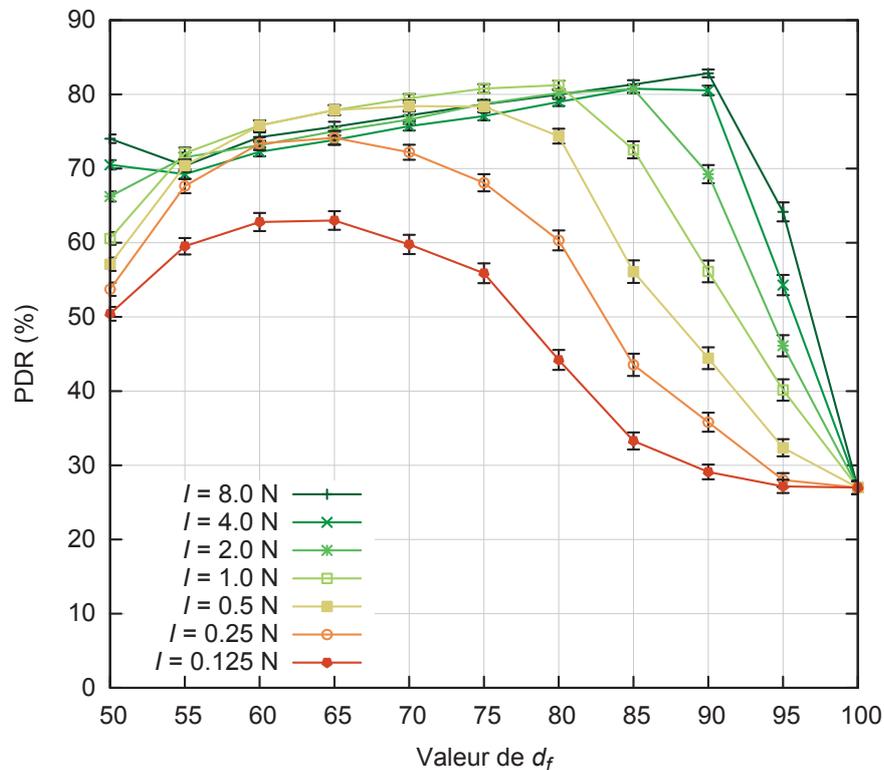


FIGURE 4.16 – PDR des paquets CBR envoyés par UAV-P vers Nc selon d_f , avec différentes valeurs de I .

Ainsi, les résultats de simulation confirment que la performance de VFPs dépend d'un choix judicieux de valeur pour le paramètre I . Plus précisément, on peut constater que la performance, en termes de PDR, augmente lorsque I augmente, jusqu'à atteindre le seuil $I = 1$ N. Une valeur plus importante pour I permet d'utiliser des valeurs plus importantes pour d_f , et ainsi la perspective d'obtenir des distances inter-nœuds plus importantes dans les chaînes de communication VFP. Cependant, I ne peut être indéfiniment augmentée, puisque ce paramètre est contraint par les possibilités d'accélération inhérentes aux véhicules mobiles considérés. Pour ces raisons, nous choisissons donc, pour le reste de ce chapitre et des chapitres suivants, une valeur conservatrice de $I = 1$ N, compatible avec de nombreux types d'UAV, quel que soit le mode de propulsion et les caractéristiques aérodynamiques de ces derniers.

4.3.4 Impact du coefficient de frottement Cx

De la même manière que I caractérise les effets d'attraction-répulsion dans les zones définies à cet effet autour d'un nœud mettant en œuvre VFPs, le paramètre sans dimension Cx représente un coefficient d'une force de frottement virtuelle f_{fr} telle que définie par (3.2) dans le chapitre précédent. Nous avons donc cherché à évaluer comment la performance du réseau évoluait avec Cx .

PDR

La Fig. 4.17 montre de multiples courbes de PDR selon d_f dans son intervalle habituel de valeurs, ainsi que selon Cx qui lui varie de 0 à 32. Pour cet ensemble de valeurs, le meilleur PDR est obtenu pour $Cx = 2$ quand le paramètre d_f est lui dans l'intervalle [75 m, 80 m], ce qui renforce l'intérêt précédemment souligné de cet intervalle de valeurs pour d_f . En ce qui concerne les autres valeurs de Cx , il est important de souligner que tout comme pour une force physique de frottement, une valeur plus importante de Cx entraîne une diminution plus rapide de la vitesse d'un nœud sous l'effet de cette force. Ce dernier aura en conséquence tendance à s'immobiliser plus près des frontières de la zone de frottement, c'est-à-dire plus près de la frontière répulsion/frottement d'un nœud ayant préalablement exercé une force de répulsion, ou au contraire plus près de la frontière frottement/attraction d'un nœud ayant préalablement exercé une force d'attraction. Ainsi, avec de grandes valeurs de Cx , un nœud sous l'effet de forces virtuelles aura tendance à se retrouver plus près d'une frontière (c'est-à-dire répulsion/frottement ou frottement/attraction) que de l'autre, provoquant dans notre scénario de déploiement un déséquilibre en termes de distances entre nœuds intermédiaires d'une chaîne de communication, selon que les prédécesseurs exercent une force attractive ou répulsive. Ce comportement produit ici un effet délétère, dans la mesure où des forces virtuelles d'attraction ou de répulsion sont également susceptibles d'être exercées. La Fig. 4.17 confirme que le PDR observé décroît quand Cx augmente de 2 à 32 (les valeurs plus importantes donnant des résultats quasiment identiques à celui produit par $Cx = 32$, et ne sont pas représentés dans la figure par souci de lisibilité). De plus, il faut noter que, de manière similaire à ce qui était constaté pour I , l'utilisation d'une valeur élevée pour Cx provoque par construction une traînée virtuelle appliquée sur l'UAV considéré. La mise en œuvre de cette force virtuelle nécessite concrètement d'appliquer une poussée s'opposant au mouvement, celle-ci étant, de manière inhérente aux caractéristique de l'UAV, limitée. Par conséquent, attribuer une valeur élevée à Cx peut s'avérer irréaliste si cette valeur s'avère incohérente avec les capacités de propulsion employées. En revanche, une valeur plus faible pour Cx permet à un nœud de pénétrer plus profondément dans (et même de traverser, si Cx est suffisamment faible) la zone de frottement du nœud voisin émettant

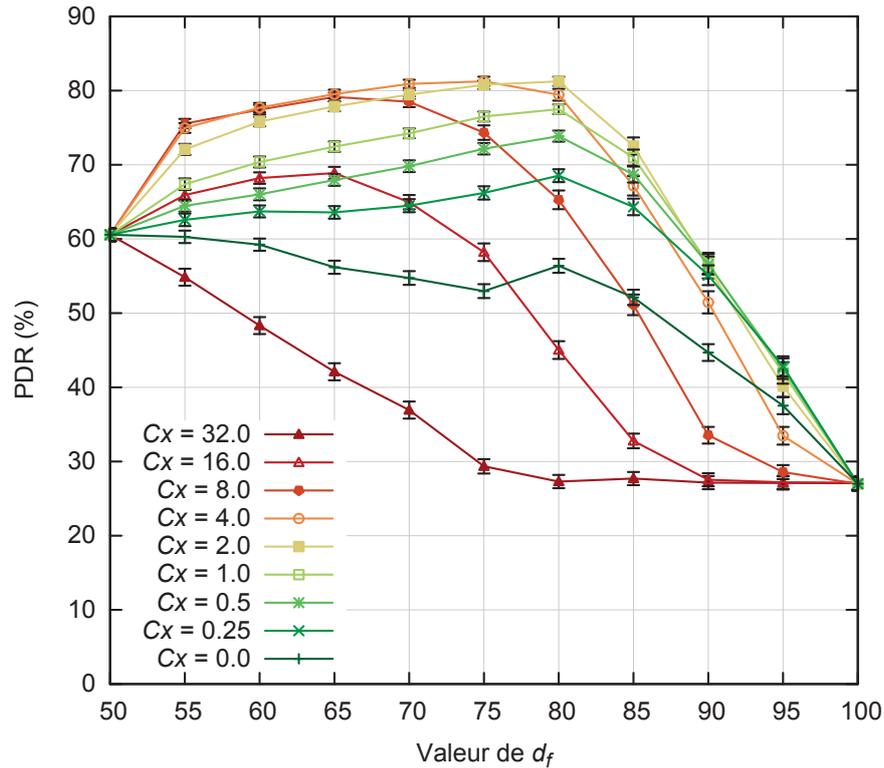


FIGURE 4.17 – PDR des paquets CBR envoyés par UAV-P vers Nc selon d_f , avec différentes valeurs de Cx .

les forces virtuelles. Cependant, pour des valeurs plus faibles de Cx , ce nœud prendra plus de temps pour s'immobiliser aux coordonnées requises, et ne parviendra même pas à se stabiliser sur une position quelconque dans le cas où $Cx = 0$. De $Cx = 2$ jusqu'à $Cx = 0$, les résultats de simulation vérifient cette observation, le PDR diminuant dans ce cas régulièrement quelque soit la valeur de d_f .

Délai de bout-en-bout

Comme noté précédemment pour le paramètre I , les simulations montrent ici également que les paquets CBR sont reçus dans un délai de bout-en-bout maximum de 1,5 ms pour toute valeur considérée du couple (d_f, Cx) . Ainsi, ce critère de performance ne remet pas en question les observations déjà présentées sur la base de la métrique de PDR. Pour conclure cette sous-section, la détermination d'une valeur appropriée pour le paramètre Cx est facilitée par l'existence d'un maximum, qui correspond, dans le contexte des hypothèses relatives à notre scénario de simulation, des paramètres manipulés et de l'ensemble de forces virtuelles considérées, à $Cx = 2$.

4.3.5 Impact des seuils de distance

Nous nous sommes enfin intéressés à la valorisation d'une dernière paire de paramètres-clés associés au protocole VFPs, avec l'étude de Th_{dmin} et Th_{dmax} . Ces deux paramètres représentent des seuils de distance, utilisés par un nœud mettant en œuvre VFPs pour respectivement déterminer si un successeur existant devrait être supprimé d'une chaîne de communication et si un nouveau nœud intermédiaire devrait être inséré dans une chaîne. De plus, en ce qui concerne la variation de Th_{dmax} dans l'intervalle $[d_r, d_a]$ (c'est-à-dire avec les valeurs choisies et récapitulées dans la Table 4.1, dans [50 m, 100 m]), le comportement suivant est attendu :

- Une petite valeur pour Th_{dmax} , proche de d_r , provoque la formation de chaînes de communication avec des distances relativement faibles entre nœuds intermédiaires successifs. En ce qui concerne notre scénario applicatif, une insertion hâtive de nœuds UAV-R peut s'avérer contre-productive, dans la mesure où ces nœuds nouvellement insérés ne seront pas forcément utilisés comme des relais de routage par le protocole MANET sous-jacent.
- A l'opposé, dans le contexte d'une valeur élevée de Th_{dmax} , les nouveaux nœuds UAV-R seront insérés lorsque la longueur du lien de communication avec leurs successeurs est déjà proche de d_a , et donc naturellement d'après (4.1), proche de $r_{portée}$. En conséquence, ces liens de communication sont susceptibles d'être rapidement rompus alors même que de nouveaux nœuds intermédiaires ont été introduits. Ce comportement est susceptible de peser négativement sur la performance du réseau.

Nous avons par la suite réalisé une série de simulations en supposant $d_f = 75$ m (d_f appartenant donc à l'intervalle optimal précédemment déterminé dans la Sous-section 4.3.2) et avons analysé les variations de Th_{dmin} et Th_{dmax} , tous deux dans l'intervalle [$d_r = 50$ m, $d_a = 100$ m]. Il est utile de noter que les simulations illustrées par les Fig. 4.18, 4.19 et 4.20 n'affichent que des mesures qui ont un sens, et qui vérifient en particulier $Th_{dmin} < Th_{dmax}$.

PDR

La Fig. 4.18 représente l'évolution de plusieurs courbes de PDR selon Th_{dmax} , chacune pour une valeur fixée de Th_{dmin} . De manière évidente, l'observation de ces courbes montre que choisir les deux seuils Th_{dmin} et Th_{dmax} dans l'intervalle [40 m, 80 m] entraîne une valeur de PDR quasiment constante quelles que soient les valeurs des deux seuils dans cet intervalle. Au contraire, choisir des valeurs en dehors de cet intervalle provoque une baisse significative de PDR. Incidemment, il faut aussi noter que faire varier la valeur de Th_{dmin} n'a pas d'impact notable sur la performance obtenue tant que Th_{dmax} se trouve dans l'intervalle de valeur précité.

Stabilité de la chaîne de communication

En outre, nous avons étudié la stabilité des chaînes de communication formées par VFPs. Plus précisément, la Fig. 4.19 montre le nombre d'événements d'insertion/retrait de nœuds intermédiaires dans une chaîne donnée, pour une valeur fixée de la paire (Th_{dmin} , Th_{dmax}). Il faut à ce stade mentionner que dans l'intervalle précédemment déterminé de Th_{dmax} aboutissant au meilleur PDR, c'est-à-dire [40 m, 80 m], le nombre d'événements d'insertion/retrait dans la chaîne décroît régulièrement tandis que Th_{dmax} augmente. En particulier, en comparaison des 34 insertions/retraits obtenus pour $Th_{dmax} = 40$ m, cette valeur décroît d'environ 11% pour $Th_{dmax} = 60$ m et de 21% pour $Th_{dmax} = 80$ m. Puisque nous avons précédemment observé avec la Fig. 4.18 un PDR quasi-constant dans l'intervalle précité, il est donc préférable de fixer une valeur de Th_{dmax} proche de la borne supérieure de l'intervalle, c'est-à-dire $Th_{dmax} = 80$ m. On notera également que deux paires de valeurs (10 m, 20 m) et (10 m, 30 m) pour le couple (Th_{dmin} , Th_{dmax}) amènent une augmentation importante des événements d'insertion/retrait observés. Bien que les deux seuils soient hors de l'intervalle précédemment recommandé, cette augmentation nécessite une brève explication : une analyse détaillée des traces de simulation, lorsqu'une telle valorisation est fixée, montre que dans ces cas, les nœuds intermédiaires peuvent être sous l'effet de forces d'attraction-répulsion inopportunes, dans des directions opposées à celles de leurs prédécesseurs respectifs, provoquant des événements

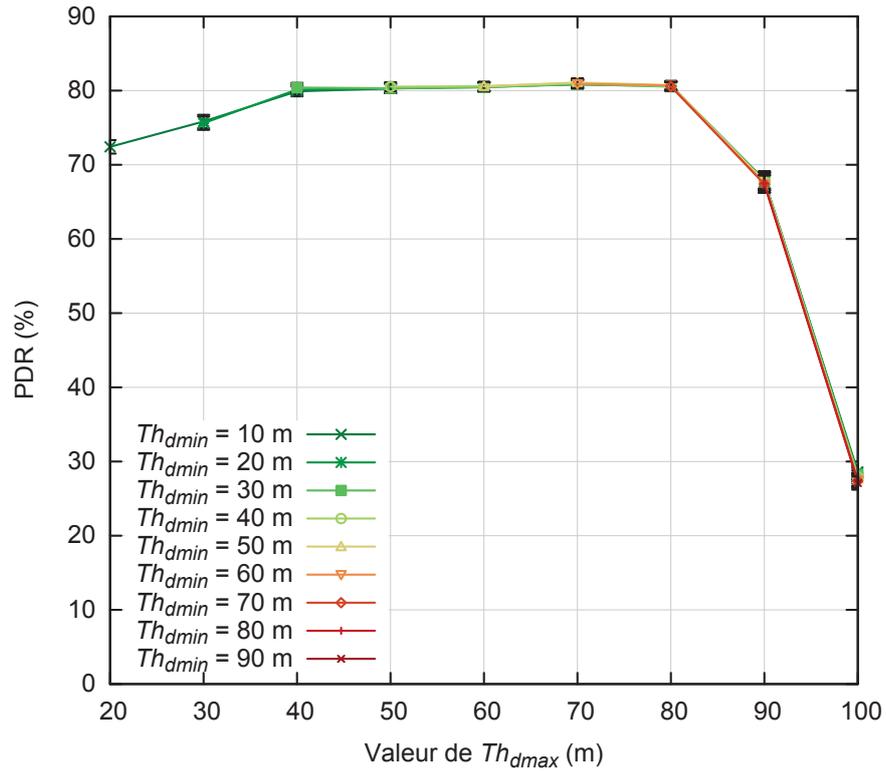


FIGURE 4.18 – PDR relatif aux paquets CBR reçus par Nc en provenance d’UAV-P, selon les seuils Th_{dmin} et Th_{dmax} .

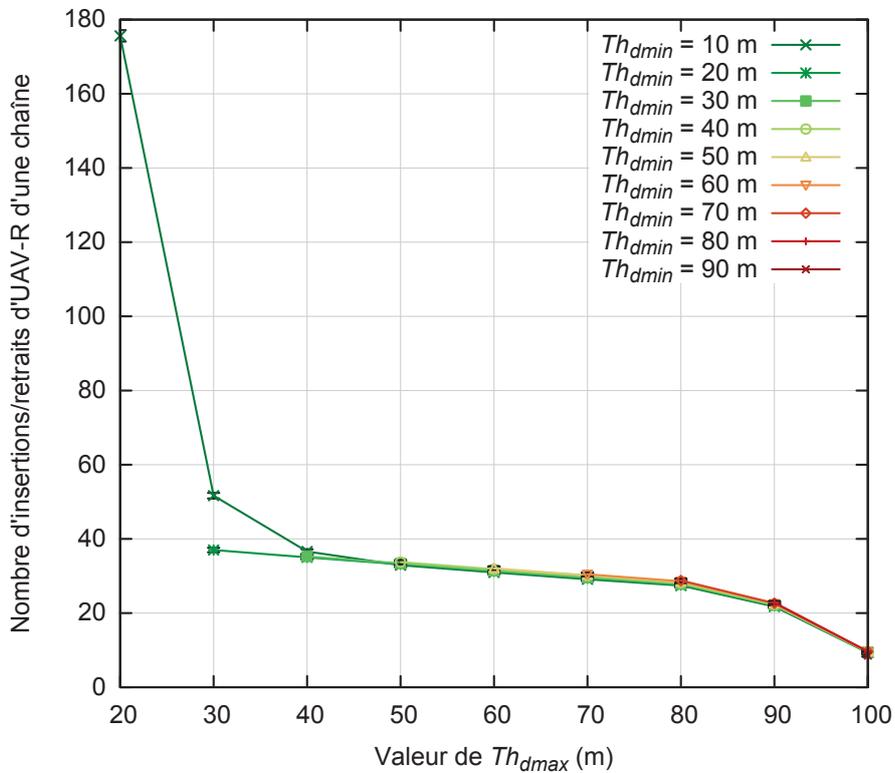


FIGURE 4.19 – Événements d’insertion/retrait d’un UAV-R dans une chaîne de communication VFP, selon les seuils Th_{dmin} et Th_{dmax} .

non désirés dans les chaînes, suffisant à expliquer le nombre élevé d'insertions et de retraits pour les deux paires de valeurs mentionnées.

Nombre d'UAVs de réserve

Nous nous sommes finalement intéressés au nombre moyen de nœuds intermédiaires nécessaire pour former une chaîne de communication VFP dans le cadre de notre scénario applicatif. Cette dernière analyse représente de fait un aspect important de l'étude, dans la mesure où le protocole VFPs est conçu pour s'appuyer sur un ensemble restreint de nœuds réseaux, devant en conséquence être utilisés de manière la plus efficace possible. Pour ce faire, la Fig. 4.20 illustre, pour chaque valeur considérée de la paire (Th_{dmin} , Th_{dmax}), la taille moyenne de l'ensemble de nœuds-relais inutilisés (en d'autres termes, il s'agit aussi du nombre moyen de nœuds supplémentaires UAV-S en réserve sur la durée de la simulation). Pour l'intervalle précédemment identifié [40 m, 80 m] donnant les meilleurs résultats de PDR, nous pouvons vérifier que l'ensemble d'UAV inutilisés augmente avec Th_{dmax} (cet ensemble étant 7% plus grand lorsque $Th_{dmax} = 80$ m, en comparaison avec sa taille lorsque $Th_{dmax} = 40$ m). De plus, l'ensemble d'UAV inutilisés augmente aussi avec Th_{dmin} : par exemple, pour $Th_{dmax} = 80$ m, fixer $Th_{dmin} = 70$ m entraîne un ensemble d'UAV-S 6% plus grand en comparaison de sa taille pour $Th_{dmin} = 10$ m. Ces deux résultats sont naturellement conformes à nos attentes, puisqu'une valeur Th_{dmax} plus importante implique une insertion de nœuds-relais plus tardive dans les chaînes, comme nous l'avons vu dans la sous-section précédente. De la même manière, un Th_{dmin} plus grand provoquera le retrait plus précoce des nœuds intermédiaires jugés non nécessaires dans les chaînes de communication. De fait, augmenter ces seuils influe favorablement sur l'ensemble de nœuds UAV-S de réserve. Au contraire, choisir des valeurs inférieures amène une diminution sensible de la taille de l'ensemble d'UAV-S de

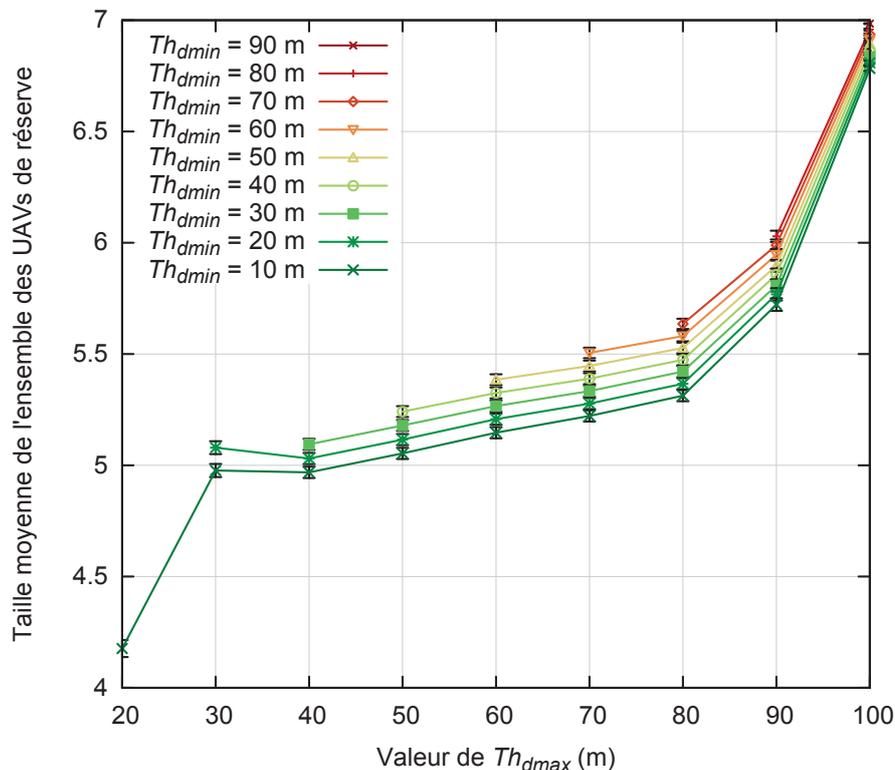


FIGURE 4.20 – Nombre moyen d'UAV de réserve dans la simulation, selon les seuils Th_{dmin} et Th_{dmax} .

réserve (et, comme vu précédemment avec les Fig. 4.18-4.19, cela s'avère contre-productif en termes de PDR, qui diminue alors, et du nombre moyen d'insertions/retraits dans les chaînes de communication, qui lui augmente de manière importante). Enfin, utiliser pour ces deux seuils des valeurs supérieures à celles de l'intervalle recommandé va permettre de très largement augmenter la taille de l'ensemble des UAV-S de réserve, aux dépens du PDR qui lui va dans le même temps très largement décroître.

En conséquence, les résultats de simulation confirment également qu'une valorisation appropriée de la paire de paramètres (Th_{dmin} , Th_{dmax}) provoque un accroissement de la performance générale du protocole VFPs. Bien qu'en stricts termes de résultats de PDR, les valeurs appropriées de Th_{dmax} puissent être choisies dans un intervalle relativement large [40 m, 80 m] (avec en sus une contrainte simple sur Th_{dmin} , telle que $Th_{dmin} < Th_{dmax}$), les considérations de stabilité sur les chaînes VFP formées de même que la taille de l'ensemble des UAV de réserve permettent de préconiser une valeur de Th_{dmax} proche de la borne supérieure de l'intervalle mentionné, avec Th_{dmin} prenant une valeur légèrement inférieure. Dans le contexte de nos simulations, la paire ($Th_{dmin} = 70$ m, $Th_{dmax} = 80$ m) représente donc une valeur acceptable. Cependant, dans le cadre de scénarios de déploiement en conditions réalistes, les erreurs inhérentes à tous les systèmes de localisation utilisés doivent être prises en compte de manière à éviter qu'un faible écart entre les deux valeurs de seuils provoque des instabilités en termes d'événements d'insertion/retrait de nœuds-relais dans les chaînes de communication VFP. Cela étant dit, dans le cadre de notre modèle simple ne tenant pas compte de telles erreurs, et avec une différence de seuil de 10 m, nous n'avons pas détecté dans nos simulations d'effets de cette nature.

4.3.6 Enseignements

Dans ce chapitre, nous avons proposé une première stratégie de mobilité contrôlée utilisant un système de forces virtuelles d'attraction, de répulsion et de frottement telles que présentées dans le Chapitre 3, ainsi que des messages Balise simples. Afin d'étudier sa mise en œuvre dans un contexte concret, nous avons également introduit un scénario applicatif visant à lutter contre la progression d'une espèce invasive, *V. velutina*, en cherchant à identifier les nids de cette dernière au moyen d'un réseau d'UAV tout en maintenant la connectivité réseau avec une station au sol à travers une route à sauts multiples sans fil, afin de permettre la transmission de données applicatives. Dans ce contexte, et afin de comprendre comment évolue la performance d'un tel réseau, nous avons d'abord cherché à identifier un ensemble de paramètres-clés permettant de convenablement caractériser les mécanismes VFP à la base de cette stratégie VFPs. Nous avons ainsi présenté et utilisé comme base d'étude les paramètres suivants : les tailles relatives des zones d'interaction dues aux forces virtuelles, l'intensité des forces attractives et répulsives, le coefficient de frottement lorsqu'une force de frottement est appliquée, et les seuils de distances permettant de déterminer si un nœud-relais doit être inséré ou supprimé d'une chaîne.

Par la suite, sur la base de l'analyse de métriques de performance liées aux taux de délivrance de paquets utilisateur et aux délais de bout-en-bout associés, nous avons pu déterminer les plages de valeurs permettant d'obtenir les meilleures performances du réseau, pour chacun de ces paramètres. Dans la suite de ce manuscrit de thèse, nous nous appuyerons sur ces résultats en choisissant des valeurs de paramètres-clés cohérentes avec les intervalles déterminés dans ce chapitre.

Chapitre 5

Utilisation et évaluation de VFPe dans un réseau spontané

Sommaire

5.1	Le contexte des réseaux rapidement déployables	73
5.2	Scénario réseau	75
5.2.1	Types de nœuds	75
5.2.2	Motifs de mobilité	76
5.3	Utilisation de VFPe dans un réseau spontané	76
5.3.1	Hypothèses de simulation	76
5.3.2	Incidence de la taille de contact entre les nœuds	77
5.3.3	Incidence du nombre de nœuds	80
5.3.4	Enseignements	83

5.1 Le contexte des réseaux rapidement déployables

Lors d'une situation de crise provoquée par une catastrophe ou par un incident non planifié, les systèmes de télécommunications jouent un rôle crucial dans le support d'activités concertées de secours et plus généralement dans le rétablissement efficace des infrastructures et des conditions de vie normales pour les populations affectées. Pour répondre à ces besoins, de nombreuses architectures de réseaux temporaires s'appuyant sur des technologies terrestres ou satellites ont été proposées [7]. Toutes ces architectures ont été conçues pour répondre aux besoins spécifiques des **équipes de protection du public et de secours en cas de catastrophe (PPDR)**, comprenant la nécessité de disposer d'un réseau adapté aux environnements difficiles, qu'il s'agisse de contraintes de températures, d'hygrométrie, de topologie du terrain, d'obstacles sur la zone de l'incident, etc. Ces réseaux requièrent de plus des équipements robustes, souvent utilisés en situation de déplacement, devant en outre être capables de constituer rapidement une infrastructure temporaire de communication capable de se substituer aux réseaux opérés en temps normal, ces derniers pouvant en situation de crise être soumis à divers dysfonctionnements, qu'il s'agisse de perturbations, de pannes, voire de la destruction d'une partie des systèmes les constituant [88]. À cet égard, le **comité des communications électroniques (ECC)**, un organe de la **conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications (CEPT)**, définit un réseau destiné à une utilisation dans un contexte PPDR comme une infrastructure de communication capable de fournir rapidement une couverture réseau additionnelle et temporaire sur la zone d'incident concernée. L'ECC cite notamment l'exemple des **MANET** [89].

Ces dernières années, les plate-formes aériennes, c'est-à-dire l'ensemble des réseaux pouvant être déployés par le moyen de systèmes de communication aéroportés, ont également été l'objet d'un intérêt notable dans le contexte des déploiements réseaux à destination des utilisateurs PPDR. En effet, celles-ci peuvent être conçues pour voler et fonctionner à des altitudes différentes et connaissent un essor croissant grâce aux multiples avantages qu'elles peuvent offrir pour les communications de secours en cas de catastrophe [90]. Parmi les apports attendus, on peut souligner le bénéfice de propagations radiofréquences favorables, pendant lesquelles les transmissions sont fréquemment réalisées en conditions LOS. De la même manière, de faibles latences sont généralement obtenues en comparaison avec celles observées sur des liaisons satellites. Enfin, ces plate-formes permettent de rendre la charge utile de communication modulaire, permettant ainsi une grande souplesse d'adaptation aux différentes missions dans lesquelles ces plate-formes sont employées.

Pour ces raisons, les instances de régulation ont commencé à considérer les plate-formes aériennes comme un ensemble crédible de technologies aptes à accompagner une réponse adaptée en situation d'urgence, en particulier dans les premières heures suivant un désastre [91], au moyen de différents types et tailles de plate-formes aériennes. En effet, chaque classe de plate-forme possède des caractéristiques distinctes et particulièrement adaptées à différentes perspectives applicatives, comme nous le détaillerons ultérieurement et dans un contexte plus général dans la sous-section 7.1.1. Par exemple, les ballons captifs de basse altitude ont été objets de nombreuses études dans le contexte des interventions de secours en cas de désastre [4, 92, 93]. Cet intérêt s'explique en particulier par le coût généralement faible de ce type de solutions, mais aussi par leur relative simplicité de mise en œuvre, ainsi que par leur capacité à rapidement emporter un équipement de télécommunication à une altitude permettant à ce dernier de fonctionner comme une tour de transmission cellulaire temporaire, le temps que la situation de crise soit circonscrite. D'autres activités de recherches s'appliquent à évaluer l'intérêt d'une **plate-forme de haute altitude (HAP)** dans le contexte des communications de secours [2]. Bien que

confrontées à des défis techniques de nature multiple, de telles solutions pourraient offrir de larges couvertures réseau depuis la basse stratosphère pendant des semaines, voire même des mois.

Par ailleurs, les principes des réseaux rapidement déployables sont également considérés avec un intérêt croissant pour la fourniture de services temporaires. En effet, dans ce cadre d'utilisation, l'organisation d'événements de différente nature peut amener une forte augmentation du nombre d'utilisateurs souhaitant se connecter à un réseau. Or, cette soudaine demande en ressources de télécommunications peut nettement dépasser ce que les infrastructures existantes, si tenté qu'il existe de telles infrastructures dans les zones considérées, sont capables d'offrir. Ce type de problématique peut en particulier être observé lors de la planification de rassemblements en extérieur comme les manifestations culturelles [5] ou sportives [94]. Dans ce cas, les plate-formes aériennes sont également envisagées pour la mise en place d'un réseau rapidement déployable capable d'offrir une qualité d'expérience satisfaisante au public des événements considérés, pour le temps de leur déroulement [95].

Dans le contexte de ce chapitre et plus généralement de cette thèse, un intérêt particulier est porté aux plate-formes aériennes de basse altitude fortement mobiles, aussi connues sous la dénomination d'UAV. Celles-ci possèdent l'aptitude de se déplacer facilement selon de nombreux degrés de liberté tout en pouvant amener une petite charge utile de télécommunications à un endroit voulu, au moment désiré. De plus, nous nous concentrons sur des mécanismes de contrôle de mobilité autonomes, distribués et adaptés à une mise en place sur ce type de véhicule aérien. Ces mécanismes, lorsqu'ils permettent également à des nœuds géographiquement voisins d'adapter leur trajectoires respectives et leurs comportements de manière coopérative, au moyen d'un échange d'informations locales, sont appelés mécanismes en essaim [96, 97]. À cet égard, nous cherchons à étudier comment concevoir une stratégie de vol en essaim efficace s'appuyant sur le principe des forces virtuelles, avec l'objectif de déployer des nœuds qu'il est possible d'amener à des endroits spécifiques, en vue de former un réseau sans fil temporaire pour le support de communications de secours.

Afin de mettre en œuvre cette mobilité contrôlée, nous avons conçu le protocole VFPe, s'appuyant sur les principes de forces virtuelles et utilisant des messages Balise étendus, tels que décrits dans la Sous-section 3.2.3. En outre, cette stratégie repose non seulement sur l'utilisation des forces virtuelles d'interaction locales (c'est-à-dire, pour rappel, des forces virtuelles de répulsion, de frottement et d'attraction), mais de plus oriente ses chaînes de communication grâce au recours de forces virtuelles d'alignement, précédemment détaillées dans la Sous-section 3.1.3.

La suite de ce chapitre est structurée de la manière suivante : la Section 5.2 détaille le scénario de déploiement de réseau temporaire de secours en situation de désastre, ainsi que la topologie réseau qui sera considérée dans le cadre de ce chapitre. Puis la Section 5.3 présente une analyse la performance de VFPe sur la base de résultats de simulations représentatives. En particulier, nous étudions l'incidence de la composition des messages Balise étendus sur la performance du réseau, en cherchant à limiter la taille de ceux-ci, afin de limiter les surcharges de débits provoqués par la dissémination de tels messages de contrôle dans le réseau. Nous décrivons de surcroît une stratégie VFPe idéale, pour laquelle les informations sur les nœuds du réseau sont supposées connues à tout moment sans l'utilisation de messages Balise. Sur cette base, nous comparons le comportement de deux stratégies VFPe ne différant que par la manière dont les entrées relatives aux nœuds du réseau sont insérées dans les messages Balise : cette insertion s'effectue en effet, selon la stratégie, soit de manière aléatoire, soit sur critère de fraîcheur de dernière mise à jour de l'entrée dans les bases locales du nœud émetteur du message Balise.

5.2 Scénario réseau

5.2.1 Types de nœuds

En ce qui concerne la planification des secours en situation de catastrophe, trois phases en particulier peuvent être distinguées dans la chronologie des événements : les phases de préparation, de réponse, et par la suite de réhabilitation. Nous proposons ici une architecture réseau qui cible dans cette chronologie l'étape de réponse, donc postérieure à la catastrophe, avec l'objectif d'offrir des ressources de communication aussi rapidement et de manière aussi fiable et efficace que possible aux utilisateurs comprenant les équipes de protection, de secours, de support, ainsi que les autres populations se trouvant dans la zone d'incident considérée. À cette fin, trois types différents de nœuds réseau sont définis, comme l'illustre la Fig. 5.1 :

Les nœuds de trafic Ils matérialisent les terminaux des utilisateurs finaux et sont la source des demandes de trafic utilisateur dans la zone de désastre considérée. Nous considérons dans la suite de ce chapitre une paire (source S, destination D) de nœuds de trafic et nous observerons et analyserons les flots de données utilisateur de la source vers la destination.

Les nœuds de surveillance Ceux-ci se déplacent dans la zone d'exploration Z_e , découvrent les autres nœuds en proximité géographique et enregistrent leur position et autres données pour un usage et une dissémination ultérieures. Ainsi, contrairement aux nœuds de soutien utilisés dans le chapitre précédent, comme illustré dans la Section 4.2, et dont l'utilisation est justifiée par le besoin de disposer d'un ensemble de nœuds de réserve au sol prêts à décoller et s'insérer dans les chaînes de communication, les nœuds de surveillance jouent un rôle à part entière d'exploration et de découverte d'informations que l'on constatera dans ce chapitre nécessaire pour la bonne mise en œuvre de la mobilité contrôlée discutée dans ce chapitre.

Les nœuds-relais Ce sont des nœuds qui antérieurement étaient des nœuds de surveillance et qui ont pris la fonction de nœud intermédiaire dans une chaîne de communication à sauts multiples entre une paire (S, D) de nœuds de trafic. Quand ils ne sont plus utiles dans la chaîne considérée, ces nœuds peuvent revenir à leur fonction initiale de surveillance. On notera que dans le cadre de notre approche, on attribue un rôle supplémentaire au nœud-relais situé en bout de chaîne, lorsque cette chaîne n'est pas encore

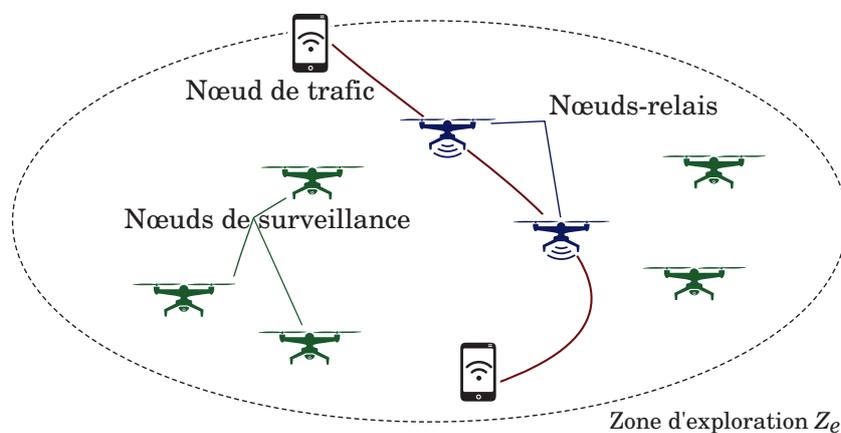


FIGURE 5.1 – Aperçu des équipements réseaux déployés dans le contexte de notre scénario considéré de secours en situation de catastrophe.

totalelement constituée, c'est-à-dire lorsqu'il n'existe pas encore une route de communication entre les deux extrémités (S, D). Ce nœud est également responsable d'évaluer, si besoin, quels nœuds de surveillance situés dans son voisinage pourraient être changés en nœuds-relais pour étendre la chaîne de communication. À ce sujet, on peut noter que nous avons déjà décrit un tel rôle attribué au nœud de poursuite, dans le chapitre précédent, comme illustré dans la Section 4.2. Lorsque ce nœud particulier n'est plus légitime dans ce rôle, parce qu'il n'est par exemple plus en bout de chaîne de communication, celui-ci perd cette responsabilité supplémentaire et redevient un nœud-relais générique.

5.2.2 Motifs de mobilité

En ce qui concerne le mouvement des nœuds, deux types de motifs de mobilité principaux peuvent être ici distingués. Premièrement, les nœuds de trafic et de surveillance parcourent la zone d'exploration Z_e de manière similaire, selon un mouvement aléatoire. Cependant, les nœuds de trafic se déplacent avec une vitesse en moyenne plus réduite, cohérente avec celle d'un piéton, en comparaison de celle des autres nœuds. Deuxièmement, les nœuds-relais mettent en œuvre une stratégie coopérative de mobilité que nous détaillons et étudions dans cette thèse. Avec ce motif de mobilité, les nœuds-relais exercent mutuellement sur leurs voisins de même type des forces virtuelles qui sont à la base du mouvement de ces nœuds.

Ces schémas de mobilité seront détaillés dans la suite de ce chapitre, et les nœuds de notre scénario réseau considéré sont en particulier dotés de motifs de mobilité précisés dans la section suivante.

5.3 Utilisation de VFPe dans un réseau spontané

5.3.1 Hypothèses de simulation

Comme expliqué précédemment, la mise en œuvre du protocole VFPe sous-tend à la fois une phase d'exploration de la zone Z_e considérée, ainsi qu'une phase de formation et de maintenance de chaîne de communication. Dans la mesure où nous étions particulièrement intéressés par l'évaluation de l'incidence des schémas d'exploration sur la performance globale de VFPe, nous avons conçu le jeu de simulations en conséquence. Les schémas de mobilité de tous les types de nœuds du réseau ont été mis en œuvre dans l'environnement de la version 3.23 du simulateur réseau ns-3 [20]. L'ensemble de ces nœuds dispose d'interfaces IEEE 802.11b/g configurées pour fonctionner sur la base de [mécanismes d'étalement de spectre par saut de fréquence et à haut débit \(HR-DSSS\)](#) à 11 Mb/s. De plus, [OLSR](#) [98] est utilisé pour le support des fonctionnalités de routage à sauts multiples. Par ailleurs, les canaux de propagation radio pour les terminaux de communications sont ici supposés idéaux. Dans le cadre des simulations qui suivent, deux nœuds de trafic constituent une paire (source, utilisateur) et créent de fait un trafic utilisateur. Cette paire est initialement disposée au hasard dans la zone d'exploration Z_e . Les autres nœuds démarrent en tant que nœuds de surveillance, et sont initialement placés au centre de symétrie de la zone Z_e . En outre, en ce qui concerne la mobilité contrôlée des nœuds-relais, VFPe est configuré de manière à ce que chaque nœud exerce des forces virtuelles cohérentes avec la valorisation des paramètres-clés donnée dans la Table 5.1, et déterminés de manière cohérente avec les résultats du chapitre 4. Les autres valeurs de paramètres de motifs de mobilité sont également données dans la Table 5.1, avec la mention de l'utilisation du modèle [RWP](#) le cas échéant.

De plus, chaque point des courbes de performance obtenues par simulation qui sont analysées dans le reste de ce chapitre est obtenu en calculant la moyenne de 2000

TABLEAU 5.1 – Principaux paramètres de simulation

Zone d'exploration	$Z_e = 1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$	
Motifs de mobilité	Nœud de trafic	Position de départ uniformément distribuée dans Z_e , RWP, vitesse $\in [0.25, 1] \text{ m/s}$
	Nœud de surveillance	Position de départ au centre de Z_e , RWP, vitesse $\in [5, 10] \text{ m/s}$
	Nœud-relais	Mobilité basée sur VFPe- $\{\text{idéal, aléatoire, fraîcheur}\}$ ou sur RWP, vitesse $\in [0, 10] \text{ m/s}$
Nœuds	Nombre de nœuds de trafic = 2 Nombre initial de nœuds de surveillance = N , masse d'un nœud = 1 kg Quand sa valeur est fixe, $N = 15$. Autrement, $1 \leq N \leq 30$.	
Réseau	802.11b/g, HR-DSSS à 11 Mb/s, portée radio = 100 m, modèle de délai de propagation à vitesse constante	
Routage	Protocole OLSR avec une valorisation par défaut [98]	
VFPe paramètres forces	Intervalle d'émission des messages Balise = 1 s	
	Interaction \vec{f}	$d_r = 50 \text{ m}$, $d_f = 75 \text{ m}$, $d_a = 100 \text{ m}$, $Th_{dmin} = 40 \text{ m}$, $Th_{dmax} = 75 \text{ m}$, $I = 1 \text{ N}$
	Frottement \vec{f}_r	$Cx = 2$
	Alignement \vec{f}_a	$f_a = 2 \text{ N}$ si le nœud s'approche de la position cible d'alignement, $f_a = 4 \text{ N}$ sinon
Trafic utilisateur	Flot CBR à 10 Kb/s entre les deux nœuds de trafic, taille d'un paquet CBR = 100 octets	

simulations indépendantes. La même approche s'applique pour la mesure des temps de contacts entre des nœuds de surveillance, mentionnés par la suite dans la Sous-section 5.3.2. En outre, les marges d'erreur sont calculées sur la base d'intervalles de confiance avec un niveau de confiance de 95%. Les barres d'erreur sont affichées en conséquence, pour chaque courbe de performance dans les figures qui suivent. Enfin, les résultats de performance sont analysés selon les métriques suivantes :

- Le *PDR* est défini ici sur la base des flots de trafic utilisateur échangés entre la paire (S,D) de nœuds de trafic. À ce sujet, nous modélisons ce trafic par un flot CBR à 10 Kb/s, qui est une approche que nous jugeons pertinente dans la mesure où ce PDR prend en compte le trafic en bande étroite et à valeur ajoutée que l'on peut observer dans un réseau temporaire tel que décrit dans notre scénario. Des exemples d'un tel trafic sont les messages courts, les messages d'état prédéfinis, les communications vocales point-à-point, les accès en volume restreint aux bases de données, les messages d'état de véhicules, et le transfert d'informations de localisation [88]. Plus précisément, le PDR est dans le contexte de ce chapitre défini comme le rapport du nombre de paquets CBR reçus par le nœud de destination D sur le nombre de paquets CBR envoyés par le nœud source S.
- Le *délai de bout-en-bout* mesure la différence d'instant, entre le moment où un paquet CBR a été reçu par la couche application du nœud de destination D et le moment où ce paquet a été émis par le nœud source S, toujours au niveau de la couche application.

5.3.2 Incidence de la taille de contact entre les nœuds

Nous avons tout d'abord cherché à mieux comprendre comment évolue la performance des nœuds-relais utilisant une mobilité contrôlée de type VFPe, en fonction de la

manière dont les messages Balise sont disséminés, en particulier par les nœuds de surveillance, lorsqu'ils parcourent la surface d'exploration Z_e . Comme nous l'avons détaillé dans la Sous-section 3.2.3, les nœuds exécutant VFPe émettent régulièrement un message Balise étendu, qui contient un maximum de cs entrées relatives aux nœuds découverts antérieurement. À l'exception de la première entrée, qui renseigne sur le nœud émetteur du message Balise, nous n'avons volontairement pas spécifié au stade de la conception comment les entrées restantes devaient être choisies et priorisées lors de la construction, par le nœud émetteur, du message Balise. Au lieu de cela, nous avons développé trois variations du protocole VFPe, mais incarnant chacun un choix différent sur la composition de leurs messages Balise étendus :

- *VFPe-aléatoire* : un nœud exécutant cet agencement choisit les $cs - 1$ entrées aléatoirement parmi les informations dont il dispose localement sur les nœuds précédemment découverts, sans aucune considération de temps.
- *VFPe-fraîcheur* : cet agencement, au contraire du précédent, sélectionne les entrées à insérer dans le message Balise étendu en priorisant les informations les plus récentes, en termes de création ou de mise à jour dans les bases de données locales du nœud qui est en train de construire le message Balise étendu.
- *VFPe-idéal* : nous avons également conçu une variation de VFPe pour laquelle la connaissance de la position des nœuds n'est pas estimée sur la base des messages Balise disséminés, mais est supposée parfaitement connue à tout instant. L'intérêt de proposer une telle conception est de disposer, pour nos résultats d'analyse, d'une stratégie optimale qui puisse nous donner une référence haute en termes de performance. Cependant, cet agencement possède une logique simplifiée et centralisée, pour laquelle la manière concrète dont les positions exactes pourraient être échangées n'est pas détaillée. Il en est de même des conséquences qu'aurait la mise en œuvre de cet agencement idéal en termes de surcharge due aux messages de contrôle.

De plus, nous avons cherché à compléter l'étape de simulation en évaluant également les performances d'un modèle de mobilité *RWP* qui n'utilise donc aucune des caractéristiques d'une mobilité contrôlée de type VFPe. En conséquence, aucun message Balise n'est dans ce cas disséminé et de fait, les nœuds de surveillance n'ont jamais l'opportunité de jouer le rôle de nœuds-relais. Ainsi, les chaînes de communication entre la paire (S,D) de nœuds de trafic ne sont jamais construites et les nœuds, qu'ils soient des nœuds-relais ou de surveillance, ne s'appuient ici que sur un motif de mobilité *RWP* et sur le protocole de routage *MANET OLSR*.

Comme précédemment mentionné dans la Sous-section 3.2.3, la *taille de contact* cs est définie comme étant le nombre d'entrées dans un message Balise, chaque entrée contenant chacune diverses informations sur un nœud du réseau. Dans cette première série de simulations, nous avons étudié l'incidence du nombre de ces entrées échangées lors d'un contact entre nœuds voisins, pendant lequel des messages Balise sont donc disséminés. Pour cela, un ensemble de simulations avec différentes valeurs de cs telles que $1 \leq cs \leq 20$ a été réalisé, pendant lesquelles ont été mesurés le *PDR* du flot *CBR* échangé entre la paire (S, D) de nœuds de trafic, ainsi que le délai de bout-en-bout pour ce même flot. Comme illustré par la Fig. 5.2, les stratégies *RWP* et *VFPe-idéal* permettent de borner par des valeurs basses et hautes un intervalle de performance, avec des *PDR* de respectivement 4% et 39%, qui restent tous deux constants avec cs . À ce stade de l'analyse, on notera que dans le contexte du scénario réseau évoqué, une valeur maximale de *PDR* en dessous de 40% ne doit pas ici être considérée comme une sous-performance, dans la mesure où cette valeur *a priori* relativement basse est avant tout la conséquence du temps

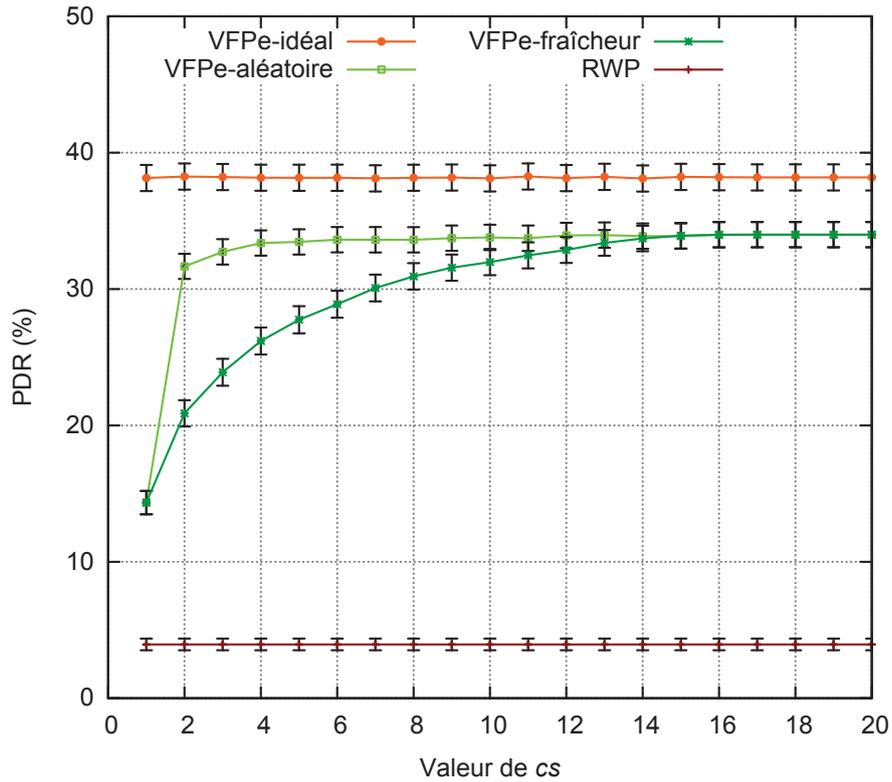


FIGURE 5.2 – PDR relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de destination D, en fonction du nombre cs d'entrées contenues dans les messages Balise.

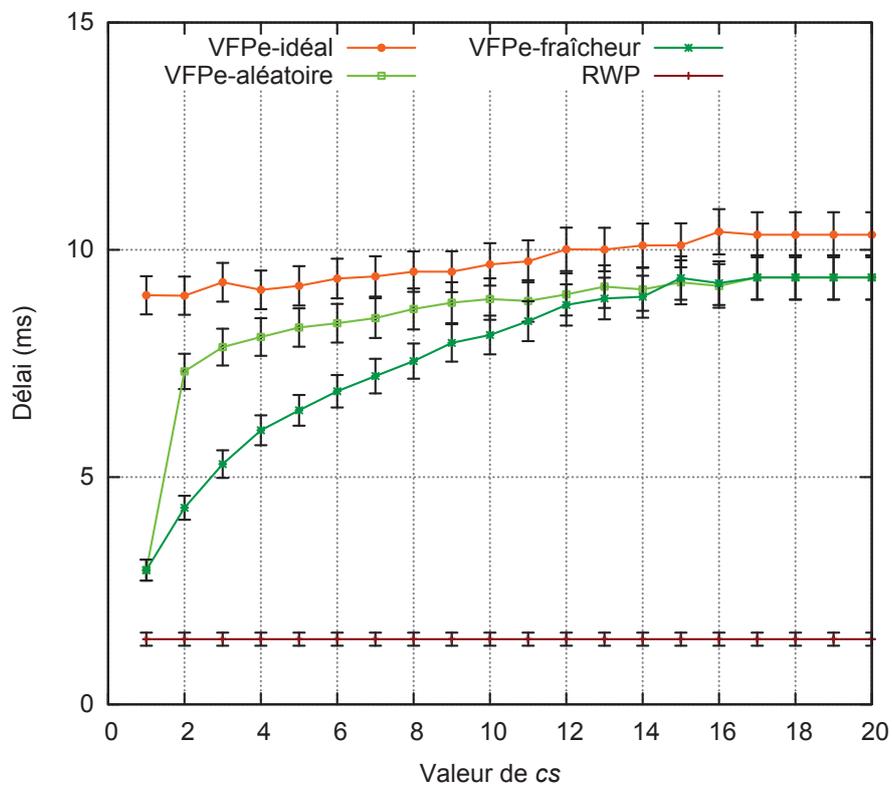


FIGURE 5.3 – Délai de bout-en-bout relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de destination D, en fonction du nombre cs d'entrées contenues dans les messages Balise.

incompressible requis par les UAV pour se déplacer et pour que la topologie en chaîne désirée puisse être constituée, et ainsi permettre la transmission du trafic utilisateur.

En ce qui concerne les stratégies utilisant VFPe et s'appuyant sur des messages Balise dont les entrées sont respectivement insérées de manière aléatoire (VFPe-aléatoire) ou sur la base de leur fraîcheur (VFPe-fraîcheur), on peut noter que le PDR est de l'ordre de 14% lorsque $cs = 1$ (c.à.d. quand les nœuds n'insèrent qu'une seule entrée, relative à eux-mêmes, dans les messages Balise) et croît selon cs , en convergeant vers une valeur de PDR similaire d'environ 34%. De plus, la stratégie avec entrées insérées aléatoirement montre une augmentation de PDR nettement plus rapide, ce dernier approchant déjà 32% pour $cs = 2$, alors que pour cette même valeur de cs , le PDR de la stratégie avec entrées insérées sur critère de fraîcheur n'atteint que 22%. Bien que ce comportement puisse apparaître *a priori* contre-intuitif, celui-ci peut cependant être expliqué au moyen des suppositions faites dans le contexte de ce scénario. À titre d'illustration, nous avons mesuré lors de nos simulations un temps de contact moyen entre les nœuds de surveillance voisins de l'ordre de 15,4 s. Ce temps est nettement plus grand que l'intervalle d'émission des messages Balise, qui est de 1 s dans nos simulations. De manière générale, plusieurs messages Balise successifs sont donc fortement susceptibles d'être transmis lors de ces temps de contact. Dans ce cas, la stratégie avec entrées insérées aléatoirement offrira plus de diversité en termes d'entrées disséminées, car *a contrario*, les entrées les plus fraîches sont peu susceptibles de changer significativement entre deux émissions successives de message Balise. La stratégie VFPe-fraîcheur offrira en conséquence peu ou pas de changements entre des messages Balise émis consécutivement. De fait, même avec des valeurs faibles pour cs , les nœuds disposeront de plus d'informations sur les nœuds du réseau avec la stratégie VFPe-aléatoire et seront déplacés vers des positions plus susceptibles de créer les chaînes de communication souhaitées entre la paire (S, D) de nœuds de trafic.

En termes de délais de bout-en-bout, la Fig. 5.3 montre la performance des quatre stratégies considérées. La stratégie RWP n'utilisant pas de messages Balise, elle exhibe logiquement un délai qui reste constant selon cs . Au contraire, celui de la stratégie VFPe-idéal croît avec cs malgré un PDR qui lui, reste constant sur la totalité de l'intervalle de valeurs de cs , comme nous l'avons vu précédemment. Pour expliquer cette observation, il est nécessaire de mentionner que pour la mise en œuvre de nos trois stratégies utilisant VFPe, chaque entrée dans un message Balise occupe 36 octets. En outre, bien que toutes les simulations utilisent une modulation HR-DSSS à 11 Mb/s, la charge utile de la trame VFPe est transmise à un débit inférieur de 1 Mb/s, les messages Balise étant envoyés en *broadcast*. En conséquence, chaque entrée supplémentaire (et donc chaque incrément de cs) implique un délai de transmission supplémentaire de 0,29 ms, qui à son tour impacte le trafic CBR placé en file d'attente avant une transmission sur le médium partagé sans fil. De plus, les délais pour les deux stratégies VFPe-aléatoire et VFPe-fraîcheur sont inférieurs à 9,5 ms sur la totalité de l'intervalle de valeurs de cs et restent donc compatibles avec les besoins en faible latence des communications inter-personnelles, par exemple. À la lumière de cette explication, on préférera logiquement l'utilisation de la stratégie à insertion aléatoire d'entrées, puisque le PDR approche déjà de sa valeur maximale pour une faible valeur de taille de contact (ex. $cs = 4$), autrement dit en utilisant un message Balise de petite taille.

5.3.3 Incidence du nombre de nœuds

Pour un scénario de déploiement donné, le nombre de systèmes mis en exploitation a un impact important sur la facilité de mise en œuvre et sur le coût total de la solution. Nous avons de fait cherché à évaluer comment la performance d'un protocole de

mobilité contrôlée comme VFPe évolue selon le nombre de nœuds du réseau, en particulier selon N , le nombre initial de nœuds de surveillance. La Fig. 5.4 illustre les résultats de PDR pour chacune des quatre stratégies de mobilité considérées, avec $1 \leq N \leq 30$. Dans cet ensemble de simulations également, la stratégie RWP donne une mesure de référence, et plus précisément une borne inférieure de performance permettant de se faire une idée concrète de ce qu'il est possible d'attendre de la part de nœuds MANET dotés d'une simple stratégie de mobilité aléatoire. Globalement, le PDR augmente légèrement de 3% à 4,5% avec N . En supposant ici $cs = 10$, les trois stratégies s'appuyant sur VFPe donnent des résultats de PDR cohérent avec les simulations de la sous-section 5.3.2. En effet, la stratégie idéale donne les meilleurs résultats pour toutes les valeurs de N dans l'intervalle considéré, tandis que VFPe-aléatoire surpasse VFPe-fraîcheur pour $N \geq 10$. En outre, on peut observer pour les trois stratégies une tendance similaire pour la courbe de PDR, à savoir une forte croissance du PDR jusqu'à un maximum situé pour des valeurs de N d'environ 16 à 18, puis une baisse régulière jusqu'à la valeur maximale $N = 30$ considérée.

De plus, les résultats illustrés par la Fig. 5.5 nous permettent de souligner que les délais de bout-en-bout pour les trois stratégies s'appuyant sur VFPe croissent rapidement avec N , bien que ces délais restent malgré tout systématiquement inférieurs à 15 ms. De manière générale, ces résultats montrent qu'un ensemble initial de N_{max} nœuds de surveillance (N_{max} tel que $16 \leq N_{max} \leq 18$ avec nos hypothèses de simulation) est suffisant pour obtenir la meilleure performance réseau en termes de PDR. À ce stade, pour bien appréhender ces résultats, il est intéressant de rappeler que l'intervalle de vitesse des nœuds de surveillance, qui est [5, 10] m/s comme indiqué dans la Table 5.1, dépasse les conditions habituelles de vitesse observées dans les scénarios habituels de type piéton, dans lesquels les protocoles MANET, et en particulier les protocoles à état de lien comme OLSR, se comportent le mieux. Dans ce contexte, quand $N = 16$, suffisamment de nœuds de surveillance sont initialement disponibles de manière à ce que VFPe permette de former les meilleures topologies de chaînes. En conséquence, au dessus de ce seuil pour N , aucun nouveau nœud de surveillance n'est statistiquement susceptible d'être converti en un nœud-relais pour étendre les chaînes de communication, et les nœuds de surveillance en excédent seront exclusivement utilisés, du point de vue de VFPe, pour un rôle d'exploration et de découverte des nœuds. Quand N dépasse ce seuil, les effets bénéfiques de l'ajout de nœuds de surveillance supplémentaires dans le réseau, et donc de l'amélioration de la diversité des liens du réseau multi-sauts sous-jacent, sont fortement entravés par les effets délétères de nœuds de surveillance croisant à vitesse relativement importante les chaînes de communication. En effet, le protocole MANET détectera ces liens temporaires et instables et essaiera d'exploiter les routes correspondantes, ce qui est ainsi susceptible de se traduire par des pertes de paquets CBR, le temps pour OLSR de détecter les pertes de lien et de reconstruire ses routes en conséquence. De plus, une analyse approfondie des traces de simulation et en particulier des tables de routage OLSR confirme un accroissement des pertes de routes provoquées par la présence temporaire de nœuds de surveillance non utiles en proximité de la chaîne, lorsque N dépasse le seuil évoqué précédemment. À ce titre, des mesures correctives pourraient être prises pour empêcher le protocole de routage d'exploiter ces liens délétères, voire pour éloigner dans ce cas les nœuds de surveillance d'une chaîne complètement formée (au moyen d'une composante de force de répulsion ajoutée dans le système de forces virtuelles, par exemple). Cependant, il est utile de souligner qu'améliorer marginalement la performance générale du réseau au moyen de nœuds supplémentaires n'est pas souhaitable dans le contexte de notre scénario de déploiement en situation de post-désastre, pour lequel nous cherchons à n'introduire qu'un nombre limité de systèmes de communications. Avec cette exigence en tête, les implications de cette analyse peuvent être résumées en trois points : tout

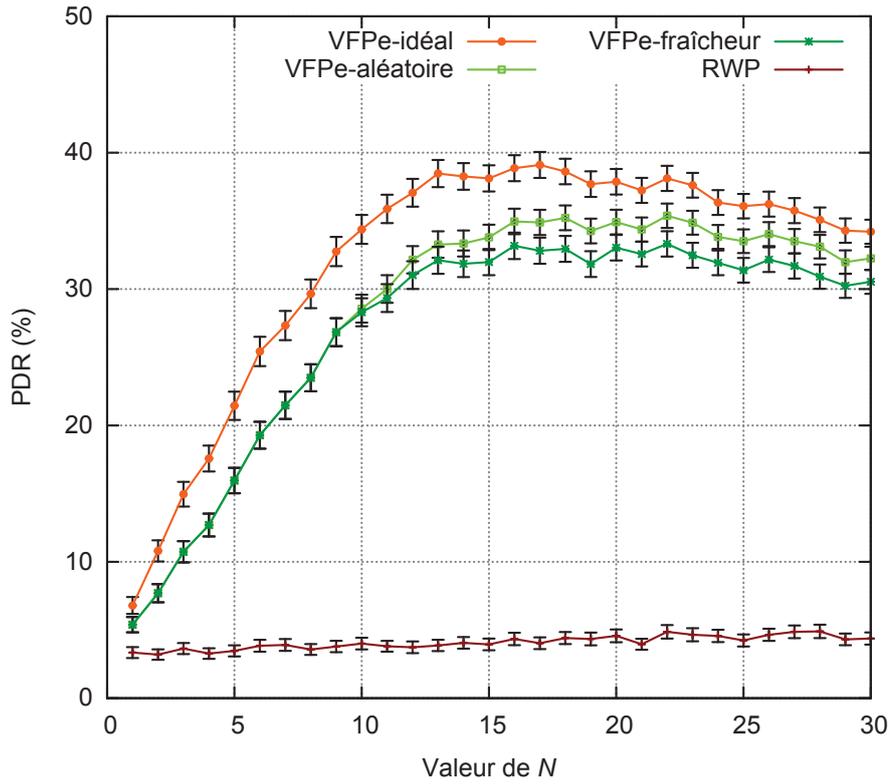


FIGURE 5.4 – PDR relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de destination D, en fonction de N , le nombre initial de nœuds de type S.

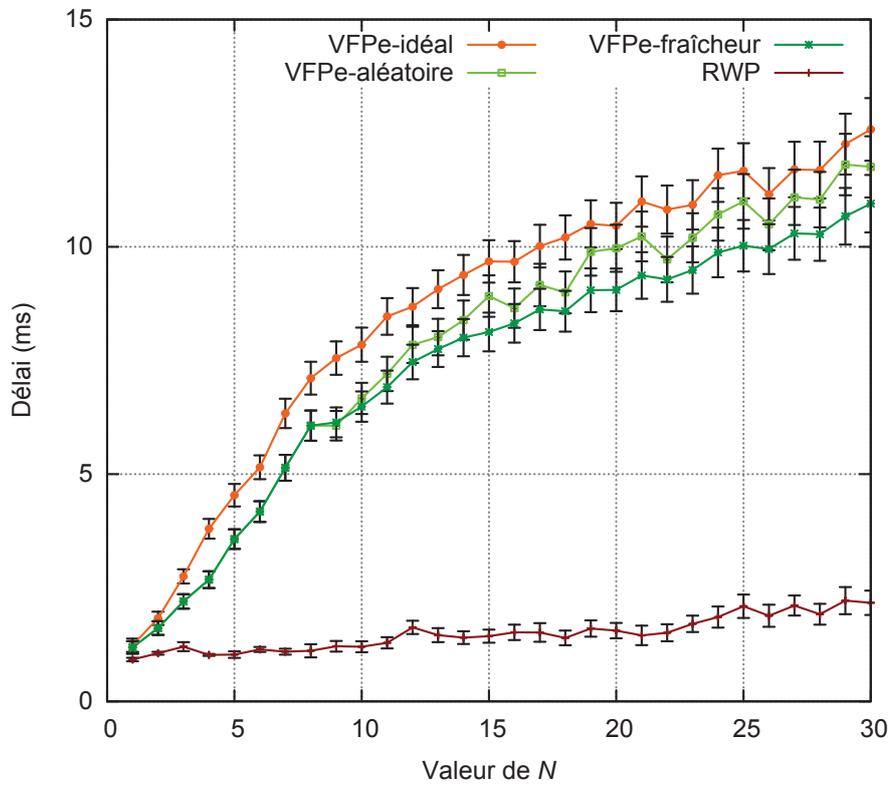


FIGURE 5.5 – Délai de bout-en-bout relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de destination D, en fonction de N , le nombre initial de nœuds de type S.

d'abord, VFPe permet d'atteindre une performance réseau satisfaisante avec un nombre limité N_{max} de nœuds. De plus, ce nombre N_{max} peut être précisément défini. Enfin, ce nombre N_{max} reste suffisamment faible ($16 \leq N_{max} \leq 18$ dans le contexte de valorisation des paramètres du scénario étudié) pour offrir une perspective économiquement réaliste de déploiement réseau en conditions réelles.

5.3.4 Enseignements

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte des déploiements rapides de réseaux mobiles en situation de post-désastre ou lors de services événementiels, nous fournissant ainsi un cadre de scénario pour la suite de l'étude. De plus, nous avons proposé une architecture réseau qui met en œuvre un déploiement visant à accompagner l'étape de réponse d'une situation de secours en permettant à des utilisateurs situés dans la zone considérée d'établir des communications à destination d'autres utilisateurs de la zone. Nous avons souligné par la suite l'intérêt d'employer des mécanismes de mobilité contrôlée pour déplacer et *in fine* disposer géographiquement au mieux les nœuds-relais afin d'acheminer efficacement le trafic entre des paires d'utilisateurs souhaitant communiquer. Afin de mettre en œuvre cette mobilité contrôlée, nous avons utilisé le protocole VFPe s'appuyant sur les principes de forces virtuelles et utilisant des messages Balise étendus, tels que décrits dans la sous-section 3.2.3. Dans ce contexte, nous avons d'abord cherché à étudier l'incidence de la composition des messages Balise étendus sur la performance du réseau, en cherchant à limiter la taille de ceux-ci, afin de limiter les surcoûts de débits provoqués par la dissémination de tels messages de contrôle dans le réseau. Nous avons conçu une stratégie VFPe idéale, pour laquelle les informations sur les nœuds du réseau sont supposées connues à tout moment sans l'utilisation de messages Balise. Sur cette base, nous avons comparé le comportement de deux stratégies VFPe ne différant que par la manière dont les entrées relatives aux nœuds du réseau sont insérées dans les messages Balise : cette insertion s'effectue en effet, selon la stratégie, soit de manière aléatoire, soit sur critère de fraîcheur de dernière mise à jour de l'entrée dans les bases locales du nœud émetteur du message Balise. Les résultats de simulation nous montrent que la stratégie VFPe à insertion aléatoire d'entrées surpasse nettement en termes de PDR, pour des petites valeurs cs du nombre d'entrées par message Balise, la deuxième stratégie VFPe dans le cadre des hypothèses de simulation considérées, et plus généralement, lorsque les temps de contact entre nœuds voisins permettent l'échange de plusieurs messages Balise successifs. Ainsi, insérer seulement 4 entrées par message Balise suffit à la stratégie à insertions aléatoires pour obtenir des performances en termes de PDR proches de celles de la stratégie VFPe idéale, tout en induisant des délais de bout-en-bout inférieurs à 10 ms.

Nous avons ensuite utilisé ces trois stratégies afin d'évaluer l'incidence du nombre N de nœuds de surveillance initiaux sur la performance du réseau. Là aussi, la stratégie VFPe à insertions aléatoires donne les meilleurs résultats en termes de PDR et s'approche des performances de celles de la stratégie idéale. Mais au delà de ce résultat, on constate également que quelle que soit la stratégie VFPe, il existe un maximum de PDR obtenu pour les valeurs de N considérées. Pour la stratégie VFPe à insertions aléatoires en particulier, on note que dans le cadre de nos hypothèses de simulation, de 16 à 18 nœuds de surveillance initialement utilisés pour le déploiement du réseau temporaire permettent d'obtenir le meilleur PDR, tout en induisant des délais de bout-en-bout n'excédant pas 10 ms. Ces résultats nous amènent donc à penser que l'usage de VFPe dans ce contexte applicatif permet de fournir une solution adaptée pour le déploiement rapide de réseaux temporaires, en particulier adaptés pour le contexte exigeant des communications de secours suite à catastrophe. De plus, nous montrons que ce type de stratégie se contente d'un nombre limité de nœuds réseau à mettre en œuvre, ce qui permet d'envisager un

déploiement réseau dans des conditions réalistes, où le coût des équipements fait également partie des critères à prendre en compte pour la sélection d'une solution adaptée.

Enfin, nous avons observé au fil de nos simulations le très net intérêt, en termes de délivrance de paquets, à mettre en œuvre sur les nœuds-relais une stratégie de mobilité contrôlée telle que VFPe plutôt qu'un simple motif de mobilité aléatoire comme RWP. Pour autant, les PDR obtenus, de l'ordre de 35% pour la stratégie VFPe à insertions aléatoires dans les conditions de nos hypothèses de simulations, ne peuvent pas convenir à tous les usages applicatifs. Afin de chercher à augmenter significativement ce taux de livraison des paquets, nous allons ainsi nous intéresser dans le chapitre suivant à l'usage conjoint d'une stratégie de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles et de mécanismes de tolérance aux perturbations et délais.

Chapitre 6

Utilisation et évaluation de VFPC dans un réseau difficile

Sommaire

6.1 Contexte et scénario	86
6.1.1 Réseaux difficiles et mécanismes tolérants aux perturbations	86
6.1.2 Scénario réseau	87
6.2 Utilisation de VFPC dans un contexte DTN	87
6.2.1 Approches envisagées	87
6.2.2 Définition d'un cadre protocolaire inter-couches	88
6.2.3 Stratégies mises en œuvre	89
6.2.4 Hypothèses de simulation	90
6.2.5 Résultats de simulation	91
Résultats généraux, PDR et de délai de bout-en-bout	92
Résultats spécifiques de VFPC, CDF des délais de bout-en-bout	95
Impact de la mobilité des nœuds de surveillance	96
6.2.6 Enseignements	97

6.1 Contexte et scénario

6.1.1 Réseaux difficiles et mécanismes tolérants aux perturbations

Dans le chapitre précédent, nous avons pu étudier des solutions de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles et constater leur intérêt pour les réseaux que nous avons qualifiés de rapidement déployables. Comme nous l'avons vu, dans ce contexte pour lequel de nombreuses solutions de communication ont été proposées ces dernières années, les mécanismes issus des MANET ont souvent été étudiés et adoptés pour répondre à ces besoins spécifiques. En effet, ceux-ci peuvent ici représenter une alternative crédible aux infrastructures cellulaires de secours [99, 100], qui peuvent s'avérer coûteuses, en particulier en termes de personnels pour déployer temporairement ce type de solution. Les MANET, de par leur capacité à former des réseaux auto-organisés s'appuyant sur le principe des communications à sauts multiples, permettent d'étendre la portée intrinsèquement limitée des transmissions sans fil des nœuds constituant ces réseaux.

Cependant, dans le contexte des réseaux difficiles [15] pour lesquels on observe en particulier une forte mobilité mais une faible densité des nœuds, la performance des MANET peut être fortement limitée par la pauvreté de la connectivité réseau et en conséquence par les perturbations sur les liens de communication, qui peuvent à leur tour provoquer une augmentation des pertes de paquets [101]. En revanche, les techniques DTN ont été conçues pour gérer efficacement la transmission des paquets de données dans le cas d'une connectivité réseau intermittente, comme on peut la trouver dans le contexte des réseaux difficiles. De plus, alors que les MANET utilisent des mécanismes de routage synchrone reposant sur la détermination d'un chemin à sauts multiples de bout-en-bout, les solutions DTN elles s'appuient sur les principes, essentiellement de nature asynchrone, des mécanismes de type *store, carry and forward* [102], selon lesquels tout nœud réseau est susceptible de pouvoir stocker et transporter les paquets de données reçus lors de son déplacement. De plus, parmi les nombreuses stratégies de routage DTN proposées, deux directions en particulier ont été amplement étudiées :

- Les stratégies reposant sur le *transfert de paquets de données*, qui, souvent utilisées conjointement avec des protocoles synchrones modifiés afin de supporter des délais de bout-en-bout plus élevés (ex. Deep-Space Transport Protocol (DS-TP) [103] et TP-Planet [104]), permettent un meilleur taux d'acheminement des paquets en comparaison de ce qu'est généralement capable d'offrir un réseau s'appuyant sur une solution MANET seule.
- Les *approches épidémiques* permettent à un nœud de transmettre des copies des paquets de données qu'il a reçus à d'autres nœuds avec lesquels il est amené à rentrer en contact. Par conséquent, de multiples copies d'un paquet spécifique peuvent exister dans le réseau au même moment, augmentant de fait les chances pour ce paquet d'atteindre sa destination. Cependant, un mécanisme de réplication systématique des paquets à chaque opportunité de contact provoquerait une consommation conséquente de ressources réseau. Plusieurs solutions, telles que MaxProp [42], RAPID [105] et Spray and Wait [43], ont ainsi été proposées pour disposer de techniques de réplifications sélectives, permettant d'obtenir un taux moyen de paquets répliqués aussi bas que possible.

À cet égard, de par la nature imprévisible de la plupart des réseaux où une connectivité intermittente est constatée, les stratégies DTN traditionnelles échouent à assurer des gains équilibrés de performance réseau lorsque plusieurs métriques de performance sont considérées conjointement, comme par exemple le PDR, le délai de bout-en-bout, le surcoût (*overhead*) des paquets de données, et les métriques représentant la consommation

de ressources. Ce constat a été nommé l'*effet fortuit* [105] produit par les stratégies DTN existantes.

L'objectif recherché dans ce chapitre est d'utiliser conjointement de tels mécanismes DTN avec les principes de mobilité contrôlée afin de diminuer, voire d'éviter cet effet fortuit. En particulier, nous allons chercher à étudier comment la mise en place d'une telle combinaison peut permettre d'obtenir un PDR satisfaisant tout en maîtrisant le délai de bout-en-bout ainsi que les surcoûts provoqués par les paquets de contrôle. Plus de détails seront donnés sur cet objectif dans la Sous-section 6.2.1

6.1.2 Scénario réseau

Le scénario de déploiement réseau, en termes de types de nœuds réseau définis, est identique à celui présenté dans le chapitre 5. En particulier, nous réutilisons dans ce chapitre les notions de nœuds de trafic, de surveillance et relais, tels que proposés dans la Section 5.2. Cette réutilisation est évidemment intentionnelle, puisque l'objectif de ce chapitre est de comparer, dans des conditions de déploiement similaires, la performance de stratégies utilisant conjointement mécanismes MANET, DTN et de mobilité contrôlée avec celles introduites dans le chapitre 5. Il est intéressant de noter qu'un élément de mobilité des nœuds de surveillance diffère cependant du contexte précédemment exposé. En effet, dans le cadre de ce chapitre, ces nœuds peuvent être dotés, selon le cas, de deux motifs de mobilité mutuellement exclusifs :

- Dans le cas général et à l'instar du motif de mobilité décrit pour les nœuds de surveillance dans le chapitre précédent, ces derniers peuvent ici aussi parcourir la zone d'exploration Z_e de manière aléatoire.
- Cependant, nous explorerons au Paragraphe 6.2.5 une stratégie de mobilité contrôlée s'appuyant sur des forces virtuelles, non seulement pour les nœuds-relais comme c'est le cas de toutes les autres stratégies étudiées, mais également pour les nœuds de surveillance. Le dessein est ici l'amélioration de la connectivité réseau obtenue globalement par l'ensemble des nœuds de surveillance, dont le nombre reste inchangé, en essayant de réduire les chevauchements de leur couverture radio. Pour ce faire, les nœuds de surveillance sont dans ce cas repoussés par les autres nœuds de surveillance voisins au moyen de forces d'interactions virtuelles. Ces forces sont telles que les rayons des zones de frottement et d'attraction sont tous deux nuls, tandis que la zone de répulsion, où est exercée une force f_{ra} constante, s'étend sur l'ensemble de la zone de couverture radio de ces nœuds.

6.2 Utilisation de VFPC dans un contexte DTN

6.2.1 Approches envisagées

L'objectif principal de ce chapitre est, en comparaison d'une utilisation conjointe d'un protocole MANET et d'une stratégie de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles telle que nous l'avons considérée dans le chapitre 5, de s'intéresser à l'adjonction supplémentaire de mécanismes DTN afin d'en étudier les gains de performance espérés. À cet effet, plusieurs approches de mise en œuvre des mécanismes DTN sont possibles, et cette étude en privilégie deux : dans un premier temps, une utilisation conjointe de mécanismes VFP et d'une solution DTN est d'abord envisagée. Cependant, nous cherchons également à dépasser les limitations liées à cette première approche et dues au phénomène d'effet fortuit mentionné en introduction de chapitre, qui se manifeste concrètement par un net gain en termes de délivrance de paquets, au détriment d'une augmentation ici inévitable des délais de bout-en-bout. C'est pourquoi, dans un deuxième temps,

nous étudions également la possibilité de mettre en œuvre une stratégie s'appuyant tout à la fois sur des mécanismes VFP, une solution DTN, mais aussi, lorsque le contexte le permet, un schéma de transfert saut-par-saut issu des MANET. L'objectif espéré au travers de cette seconde approche est de réduire significativement les délais de bout-en-bout moyens, tout en maintenant un taux de délivrance de paquets satisfaisant et en évitant d'accroître les surcoûts liés aux paquets de contrôle des solutions proposées.

6.2.2 Définition d'un cadre protocolaire inter-couches

La Fig. 6.1 donne une représentation architecturale de la double pile de routage installée sur chaque nœud du réseau considéré, celle-ci étant composée d'un schéma reposant sur des transferts de paquets et issu des MANET, aussi nommée la pile de routage synchrone, ainsi que d'un schéma de réplication des paquets issu des DTN, aussi nommée la pile de routage asynchrone. Cette figure introduit également le composant mettant en œuvre les mécanismes de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles, nommé de manière générique VFP, quelle que soit la stratégie étudiée dans la suite de ce chapitre. Ce composant héberge lui-même trois entités qui interagissent avec les autres composants principaux impliqués dans la transmission du trafic réseau ainsi que dans le contrôle de mobilité du nœud :

- Le *contrôleur de mobilité* récupère des informations telles que les vecteurs de coordonnées et de vitesse issues de l'IMU et des divers capteurs via l'autopilote du nœud [106], considéré dans ce contexte architectural comme un composant applicatif. Le contrôleur de mobilité est également responsable du calcul du système de forces virtuelles exercées sur le nœud, sur la base des informations disponibles localement. Finalement, cette entité envoie également à l'autopilote ces mesures mises à jour, par exemple sous la forme d'un vecteur vitesse ou d'un point de référence (*waypoint*) [107].
- Le *gestionnaire de liens* s'assure de périodiquement construire et émettre les messages Balise ainsi que de recevoir et stocker ceux reçus des autres nœuds du voisinage. Comme illustré par la flèche bleue, les messages Balise reposent exclusivement sur un envoi en *broadcast*, à un saut, tel que supporté par la pile de routage synchrone, et ne requièrent donc pas de mécanismes offrant la persistance des données au sens DTN, comme l'offre la pile de routage asynchrone.

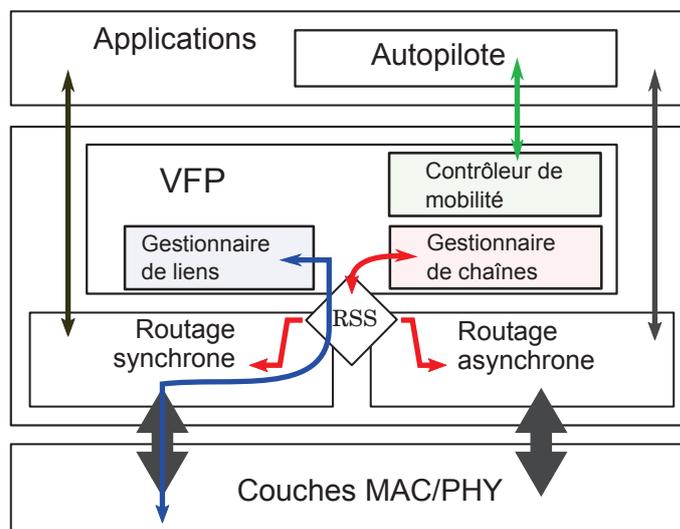


FIGURE 6.1 – Représentation du cadre protocolaire inter-couches.

- Le *gestionnaire de chaîne* interagit quant à lui avec un mécanisme d'aiguillage et de sélection, représenté par les flèches rouges, qui permet de déclencher l'utilisation de la pile de routage adéquate, selon l'état, au sens VFP, du nœud. En effet, si ce dernier n'appartient pas à une chaîne VFP constituée dont la destination correspond avec celle du trafic utilisateur à transmettre, alors les paquets de données correspondants sont pris en charge par la pile de routage asynchrone. Dans le cas contraire, le nœud dispose alors d'une route à sauts multiples via son successeur dans la chaîne vers la destination. Le mécanisme de sélection laisse alors la pile de routage synchrone prendre en charge la transmission de type saut-par-saut des paquets considérés.

6.2.3 Stratégies mises en œuvre

Bien que le cadre protocolaire présenté possède une nature générique en termes de mise en œuvre, et puisse donc permettre l'utilisation de multiples solutions de routage, des choix spécifiques de déploiement ont dû être pris afin de permettre une évaluation de la performance des stratégies évoquées. De par leur relative ubiquité, les protocoles de routage OLSR et épidémique [108], par ailleurs convenablement documentés et étudiés, ont été choisis pour la mise en œuvre concrète des piles de routages respectivement synchrones et asynchrones illustrées dans la Fig. 6.1. En ce qui concerne le protocole DTN épidémique, celui-ci dispose d'une conception s'appuyant sur un mécanisme simple d'inondation opportuniste, avec en particulier l'utilisation d'un message de contrôle pour informer les nœuds d'opportunités de contact avec les autres nœuds du voisinage. De même, le protocole épidémique bénéficie d'un autre mécanisme spécifique, nommé échange d'un vecteur-résumé (*summary vector exchange*), qui permet à deux nœuds d'échanger leurs paquets de données disjoints lors des contacts, c'est-à-dire lors des moments pendant lesquels ils se trouvent en voisinage direct.

De plus, il faut noter que le *sélecteur de pile de routage* (RSS) représenté dans la Fig. 6.1, de même qu'un schéma simple de routage synchrone de type saut-par-saut, sont mis en œuvre dans le même composant. En substance, lorsque le cadre protocolaire inter-couches est déployé dans sa totalité, et pour tout paquet de données entrant devant être traité, le composant considéré demande l'état VFP du nœud, et si besoin l'identificateur du successeur dans la chaîne. Le cas échéant, le paquet est transmis immédiatement au successeur par le schéma de routage synchrone simple. Sinon, le paquet est passé à la pile de routage asynchrone, c'est-à-dire dans le contexte de nos déploiements au routage DTN épidémique, et sera conservé en mémoire de stockage persistante pour des retransmissions ultérieures, lorsque surviendront des opportunités de contact avec des nœuds voisins.

Sur cette base, huit stratégies ont été mises en œuvre, comme l'illustre la Fig. 6.2. Les six premières ne mettent en œuvre que partiellement les composants du cadre protocolaire inter-couche considéré. La mobilité de l'agencement RWP1 est exclusivement de type RWP et n'utilise pas de forces virtuelles. RWP1 ne repose en outre que sur un routage de type MANET OLSR. Les deux agencements RWP2 et RWP2-op reposent à l'instar de RWP1 sur la seule utilisation de RWP, mais diffèrent sur le support des composants de routages. En effet, ceux-ci s'appuient seulement sur le protocole DTN épidémique. Cependant, tandis que RWP2 utilise la pile de routage épidémique avec ses principaux paramètres configurés par défaut, RWP2-op, lui, révisé cette configuration de manière à ce que la période d'échange des listes de paquets entre nœuds voisins soit réduite. En effet, dans le cas de RWP2-op, *HostRecentPeriod* = 1 s au lieu de 10 s par défaut [108]. De fait, l'utilisation de RWP2-op devrait permettre, par rapport à RWP2, une transmission accélérée des paquets de données par la pile de routage épidémique lors des contacts (c'est-à-dire lorsque les nœuds sont en portée radio directe et à même d'échanger la liste des paquets

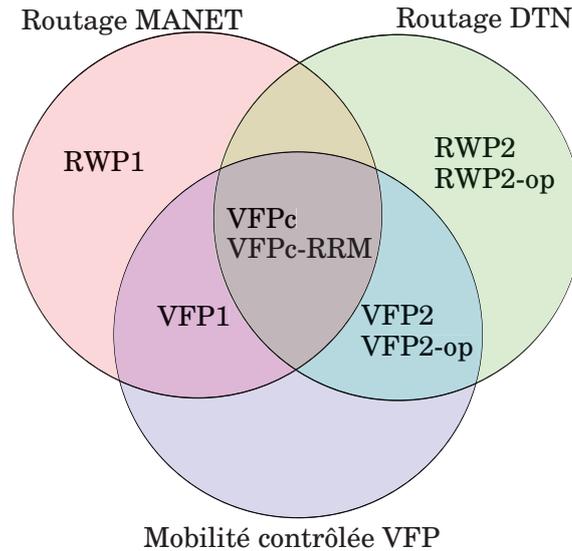


FIGURE 6.2 – Aperçu des stratégies mises en œuvre, ordonnées par ensemble de fonctions et structurées dans un diagramme de Venn.

stockés par chacun, afin de déterminer quels paquets devraient être transmis).

De plus, l'agencement **VFP1** a été conçu de manière à reposer sur une mobilité contrôlée VFP, donc à base de forces virtuelles, ainsi que sur un routage de type **MANET**, sans utilisation de routage épidémique. En conséquence, le trafic utilisateur n'est transmis que lorsqu'une route de bout-en-bout est disponible ; il est éliminé dans le cas contraire. Il est intéressant de noter que, tout comme **RWP1**, l'agencement **VFP1** a déjà été évalué, en termes de **PDR** et de délais de bout-en-bout, dans le chapitre précédent. De plus, **VFP1** utilise des messages Balise dont les entrées sont insérées de manière aléatoire : cet agencement est identique, configuration des paramètres compris, à la stratégie VFPe-aléatoire étudiée dans la Sous-section 5.3.2. Dans le contexte de l'analyse de performance menée dans la suite de ce chapitre, **RWP1** et **VFP1** sont ainsi utilisés comme base de référence pour juger de l'intérêt des autres stratégies considérées ici. Par ailleurs, les deux agencements **VFP2** et **VFP2-op** ont également été développés, reposant cette fois-ci sur une mobilité contrôlée VFP ainsi que sur un routage **DTN** épidémique exclusivement. On retrouve ici le même facteur différenciant que pour la paire (**RWP2**, **RWP2-op**) : alors que la pile de routage épidémique de **VFP2** est configurée de telle manière que *HostRecentPeriod* = 10 s, **VFP2-op** lui utilise une valeur réduite *HostRecentPeriod* = 1 s.

Enfin, les deux dernières stratégies, **VFPC** et **VFPC-RRM**, mettent en œuvre l'ensemble des composants spécifiés dans le cadre protocolaire inter-couches : le cas échéant, le composant utilisant les mécanismes VFP contrôle la mobilité du nœud, et le trafic utilisateur est contextuellement traité par la pile de routage **MANET OLSR** ou **DTN** épidémique, selon que le nœud considéré appartienne à une chaîne de communication VFP établie ou non. Il faut souligner que les deux agencements utilisent tous deux des valeurs par défaut pour les paramètres principaux du composant de routage épidémique. En outre, **VFPC** et **VFPC-RRM** ne diffèrent que par la manière dont les nœuds de surveillance se déplacent dans la zone d'exploration, comme la Sous-section 6.2.5 le précisera.

6.2.4 Hypothèses de simulation

Les paramètres de simulation ont été choisis aussi proches que possibles de ceux du chapitre précédent. La Table 6.1 reprend la liste de ces paramètres, et le cas échéant la met à jour (les paramètres révisés apparaissant en vert dans la table). Comme pour

les chapitres précédents, le simulateur réseau ns-3.23 a été utilisé pour l'ensemble des évaluations de performance analysés ci-après.

TABLEAU 6.1 – Principaux paramètres de simulation révisés

Zone d'exploration	$Z_e = 1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$	
Motifs de mobilité	Nœud de trafic	Position de départ uniformément distribuée dans Z_e , RWP, vitesse $\in [0.25, 1] \text{ m/s}$
	Nœud de surveillance	Position de départ initialement située au centre de Z_e , vitesse $\in [5, 10] \text{ m/s}$, Mobilité : basée sur VFP (VFPC-RRM) ou RWP sinon
	Nœud-relais	Mobilité apparentée à VFP ou RWP, vitesse $\in [0, 10] \text{ m/s}$
Nœuds	Nombre de nœuds de trafic = 2 Nombre initial de nœuds de surveillance = N , masse d'un nœud = 1 kg Quand sa valeur est fixe, $N = 15$. Autrement, $1 \leq N \leq 30$.	
Réseau	802.11b/g, HR-DSSS à 11 Mb/s, portée radio = 100 m, modèle de délai de propagation à vitesse constante	
Routage	MANET	OLSR avec valeurs de paramètres par défaut [98]
	DTN	Protocole épidémique [108]
VFP paramètres forces	Intervalle d'émission des messages Balise = 1 s	
	Interaction \vec{f}	$d_r = 50 \text{ m}$, $d_f = 75 \text{ m}$, $d_a = 100 \text{ m}$, $Th_{dmin} = 40 \text{ m}$, $Th_{dmax} = 75 \text{ m}$, $I = 1 \text{ N}$
	Frottement \vec{f}_{fr}	$Cx = 2$
	Alignement \vec{f}_a	$f_a = 2 \text{ N}$ si le nœud s'approche de la position cible d'alignement, $f_a = 4 \text{ N}$ sinon
Trafic utilisateur	Flot CBR à 10 Kb/s entre les deux nœuds de trafic, taille d'un paquet CBR = 100 octets	

De plus, comme mentionné dans la Sous-section 6.2.3, le routage MANET est mis en œuvre au moyen du protocole OLSR pour tous les agencements concernés à l'exception des deux stratégies inter-couche VFPC et VFPC-RRM qui elles utilisent le composant RSS précédemment décrit. Ce composant contient une solution protocolaire simplifiée de routage de type saut-par-saut. En outre, chaque point des Figs. 6.3-6.4 et des Figs. 6.5-6.9 est respectivement moyenné sur la base de 2000 et 10000 simulations indépendantes de 900 s chaque. Comme dans les résultats de simulation des chapitres précédents, les marges d'erreur sont calculées sur la base d'intervalles de confiance avec un niveau de confiance de 95%, les barres d'erreur étant affichées sur l'ensemble des figures en conséquence.

Les résultats sont analysés dans le reste de ce chapitre selon les mêmes métriques que dans la Section 5.3 : le PDR est également défini sur la base des flots de trafic CBR échangés entre la paire (S,D) de nœuds de trafic. De même, le délai de bout-en-bout reste défini comme la différence entre l'instant où un paquet CBR est reçu par la couche application du nœud de trafic D et le moment où ce paquet a été émis depuis la couche application du nœud de trafic S. Nous complétons cette observation du délai par l'analyse de la fonction de répartition (CDF) de ce délai.

6.2.5 Résultats de simulation

Nous nous sommes d'abord intéressés à la manière selon laquelle les agencements considérés se comportent lorsque le nombre initial de nœuds de surveillance augmente.

Comme antérieurement souligné, VFP1 et RWP1 ont déjà été présentés et examinés dans le chapitre précédent. Nous les prenons comme une base de référence pour évaluer la performance des autres stratégies, en termes de PDR et de délai. Les Figs. 6.3-6.4 représentent ainsi le PDR et le délai de bout-en-bout des transmissions CBR entre deux nœuds de trafic pour tous les agencements étudiés, selon le nombre N initial de nœuds de surveillance dans le réseau, tel que $1 \leq N \leq 30$.

Résultats généraux, PDR et de délai de bout-en-bout

On peut d'abord observer que RWP1 et VFP1 arborent tous deux des délais de bout-en-bout réduits (en dessous de 15 ms pour l'ensemble des valeurs de N) en comparaison des autres agencements. Cependant, VFP1, avec un PDR maximum atteignant environ 35% pour $16 \leq N \leq 18$, montre une amélioration significative par rapport à RWP1 et son PDR plus modeste, qui reste systématiquement en dessous de 5%. Comme nous l'avons détaillé dans la Section 5.3, la moindre performance de RWP1 peut être facilement expliquée par le contexte de faible densité des nœuds, ainsi que par la vitesse relativement élevée des nœuds de surveillance, dans l'intervalle [5, 10] m/s, ce qui est au delà des vitesses de type piéton que l'on trouve dans la plupart des scénarios de déploiement mettant en œuvre des MANET. De même, les résultats en termes de PDR de VFP1 sont affectés par le temps incompressible nécessaire au déplacement des nœuds, aboutissant à une formation permettant de connecter les nœuds de trafic. Cependant, dans le chapitre précédent, nous avons pu vérifier que VFPe-aléatoire, c'est-à-dire VFP1, est proche d'une stratégie de contrôle de mobilité théorique idéale, VFPe-idéal, pour laquelle la position des nœuds est toujours supposée connue sans le recours à des messages de signalisation. En conséquence, toute perspective d'amélioration de la conception de VFP1 s'appuyant sur le seul routage MANET offrirait des perspectives limitées, en particulier en ce qui concerne le PDR. En revanche, et contrairement à RWP1 et VFP1, les six stratégies s'appuyant sur le routage DTN épidémique ont en commun une très nette amélioration du PDR, aux dépens de délais significativement allongés, comme illustré par la Fig. 6.4. Dans tous les cas, le PDR de ces stratégies augmente avec N et, à cet égard, surpassent RWP1 et VFP1 dès que $N > 3$.

À ce stade, il est possible de faire une nette distinction entre les agencements supportant la pile de routage DTN épidémique (à l'exception de VFPC-RRM, pour lequel les performances seront évaluées dans le Paragraphe 6.2.5 en comparaison de VFPC), sur la base des deux métriques de PDR et de délai de bout-en-bout :

- VFPC, VFP2 et VFP2-op obtiennent systématiquement de meilleurs résultats par rapport à RWP2 et RWP2-op pour $N \geq 9$: par exemple, lorsque $N = 15$, les premiers surpassent nettement les seconds, en termes de PDR, de 7% à 15%. La Fig. 6.5, qui montre comment le PDR évolue en fonction du temps de simulation pour $N = 15$, confirme que les agencements supportant à la fois une mobilité contrôlée de type VFP ainsi qu'une pile de routage DTN épidémique surclassent systématiquement ceux offrant une combinaison de mobilité contrôlée et de routage MANET mais sans support DTN épidémique. De plus, alors que pour $N = 30$, tous les PDR sont compris entre 96% et 99,5%, VFPC, VFP2 et VFP2-op convergent plus rapidement vers leurs valeurs maximales respectives, et sont déjà au dessus de 96% pour $N \geq 15$. Cependant, pour $N \leq 7$, RWP2 et RWP2-op offrent des PDR plus élevés en comparaison de VFPC, VFP2 et VFP2-op. Il est relativement aisé d'expliquer ce résultat par le fait que des valeurs faibles de N ne permettent pas aux mécanismes de mobilité contrôlée basée sur VFP de provoquer la formation complète de chaînes de communications. À la place, les stratégies reposant sur VFP forment ici des chaînes incomplètes qui ne sont en moyenne pas suffisamment longues pour permettre la création d'un

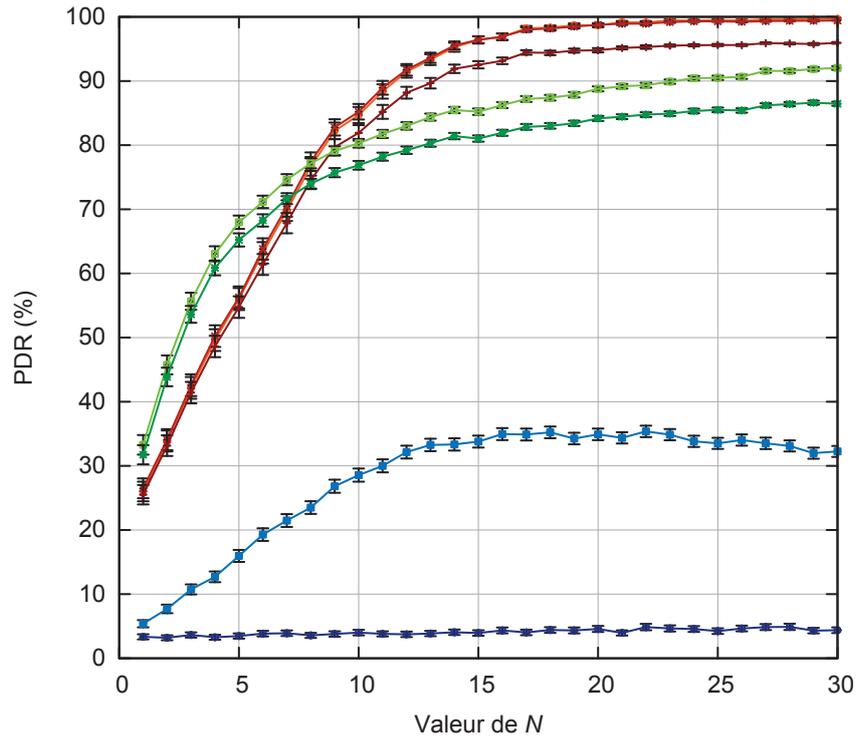


FIGURE 6.3 – PDR relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de trafic de destination D en provenance du nœud de trafic source S, selon le nombre N initial de nœuds de surveillance. La légende est identique à celle de la Fig. 6.4

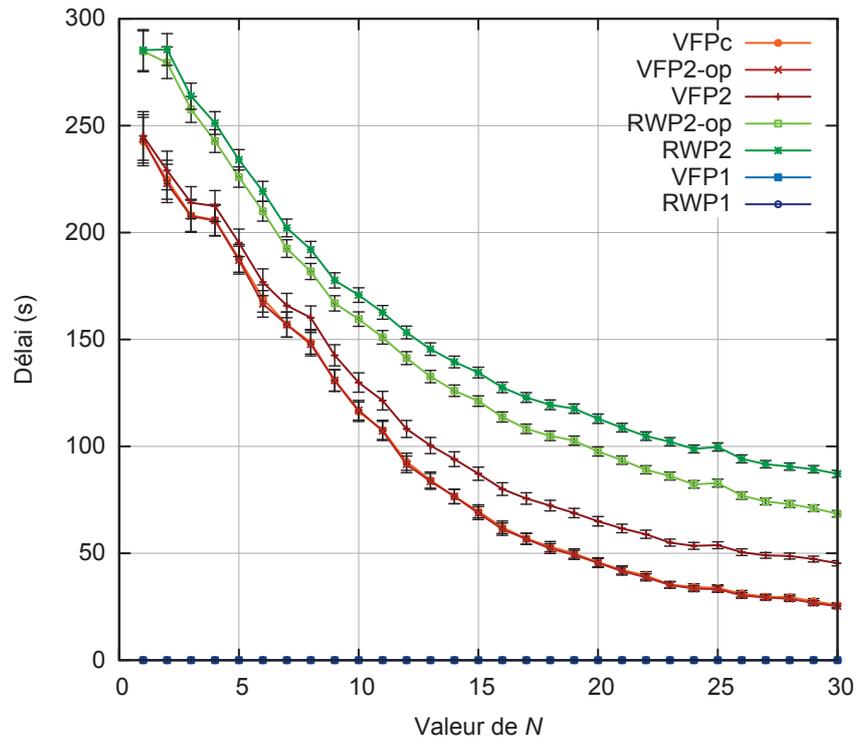


FIGURE 6.4 – Délai de bout-en-bout relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de trafic de destination D en provenance du nœud de trafic source S, selon le nombre N initial de nœuds de surveillance.

chemin de bout-en-bout entre les nœuds de trafic source et destination. Ces formations de chaînes incomplètes gaspillent en outre des nœuds intermédiaires qui pourraient plutôt parcourir la zone d'exploration en tant que nœuds de surveillance, et transmettre des paquets de données de manière opportuniste, en permettant au final de contribuer plus efficacement à l'accroissement du PDR. Cependant, pour $N > 7$, utiliser un protocole de mobilité contrôlée s'appuyant sur VFP commence à devenir plus efficace que de doter les nœuds réseau d'un simple motif de mobilité aléatoire.

- En ce qui concerne le délai, la Fig. 6.4 montre deux tendances principales : d'abord, VFPC, VFP2 et VFP2-op présentent des délais de bout-en-bout plus faibles pour n'importe quelle valeur de N . En outre, comme déjà observé pour le PDR, VFP2-op et RWP2-op se comportent mieux que les agencements sans paramètres optimisés correspondants, ce qui était naturellement attendu depuis la conception de ces stratégies. De plus, la Fig. 6.6 illustre comment le délai de bout-en-bout moyen relatif aux paquets CBR reçus par la destination depuis le début de la simulation évolue avec le temps, pour $N = 15$. VFPC, VFP2 et VFP2-op exhibent clairement un maximum au temps $t \approx 400$ s, qui correspond, pour le scénario considéré, au temps le plus probable d'établissement de la chaîne de communication VFP. Les paquets de données peuvent alors être transmis le long de la route à sauts multiples formée par les nœuds-relais. Il s'ensuit que les paquets CBR sont alors susceptibles d'atteindre leur destination dans un délai significativement réduit, diminuant le délai de bout-en-bout moyen en conséquence. En revanche, le délai de bout-en-bout moyen de RWP2 et de RWP2-op ne décroît jamais avec le temps. À la fin du temps total de simulation, celui de RWP2-op atteint une valeur stationnaire, tandis que celui de RWP2 augmente encore.

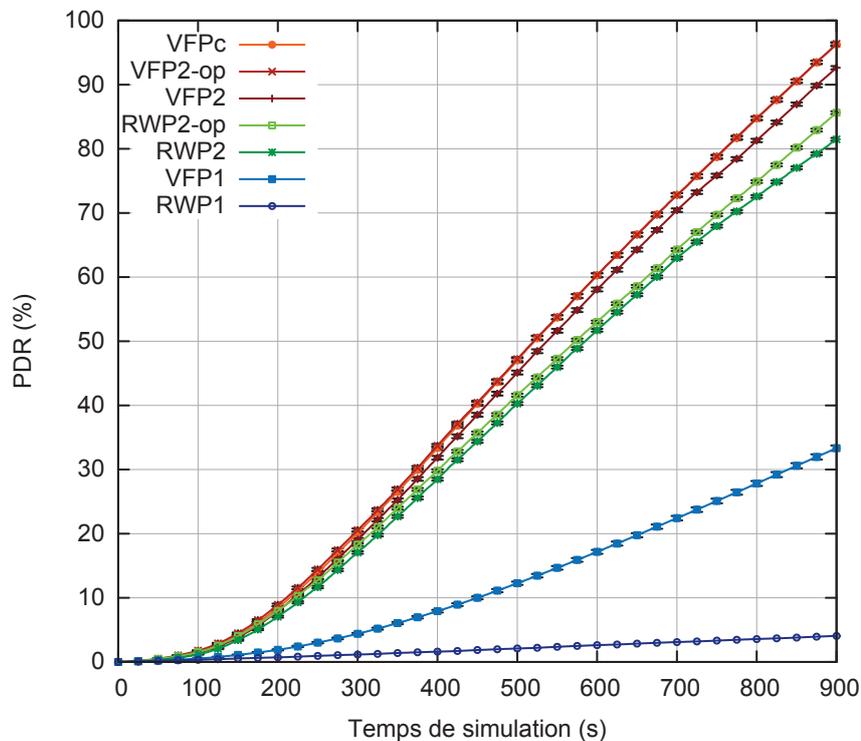


FIGURE 6.5 – PDR relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de trafic de destination D en provenance du nœud de trafic source S, selon le temps t de simulation. $N = 15$.

Résultats spécifiques de VFPC, CDF des délais de bout-en-bout

Le cas spécifique de la stratégie VFPC, mettant en œuvre la totalité du cadre protocolaire inter-couches, est maintenant analysé. Bien que VFPC utilise une pile de routage DTN épidémique avec une valorisation par défaut et donc non optimisée, on constate, au moyen de la Fig. 6.3 et de la Fig. 6.5, que ses résultats en termes de PDR sont pourtant quasiment identiques à ceux de VFP2-op. Comme l'illustre la Fig. 6.4, la même analyse peut être faite sur les délais de bout-en-bout moyens. La Fig. 6.6 montre que VFP2-op obtient une performance légèrement meilleure que celle de VFPC pendant une partie de la simulation, bien que les délais de bout-en-bout des deux stratégies finissent, en fin de simulation, par correspondre. De fait, elles exhibent une performance comparable en termes de PDR et de délai moyen, mais VFPC possède l'avantage d'un comportement plus sobre en termes de surcoût des paquets de contrôle (*overhead*), grâce à l'utilisation de valeurs par défaut pour les paramètres épidémiques, ce qui amène une moindre génération de messages de contrôle.

De plus, une étude détaillée des distributions de délai révèle l'existence d'un argument prépondérant, au-delà des aspects de limitation du surcoût du routage DTN épidémique, amenant à sérieusement préférer l'usage de VFPC. La Fig. 6.7 affiche la CDF des délais de bout-en-bout relatifs au trafic CBR pour tous les agencements supportant au moins le routage DTN épidémique. Parmi ces derniers, ceux mettant en œuvre une mobilité RWP exhibent les délais les plus importants : seulement 1% et 6% des paquets de données CBR sont respectivement reçus dans la seconde lorsque RWP2 et RWP2-op sont déployés. Pour les stratégies s'appuyant sur VFP, les distributions de délai varient considérablement : alors qu'environ 56% des paquets CBR sont reçus en moins de 7 s lorsque VFPC ou VFP2-op sont déployés, seulement 8% des paquets CBR sont reçus dans cette fenêtre de temps avec VFP2. Cependant, il faut aussi constater qu'alors que quasiment au-

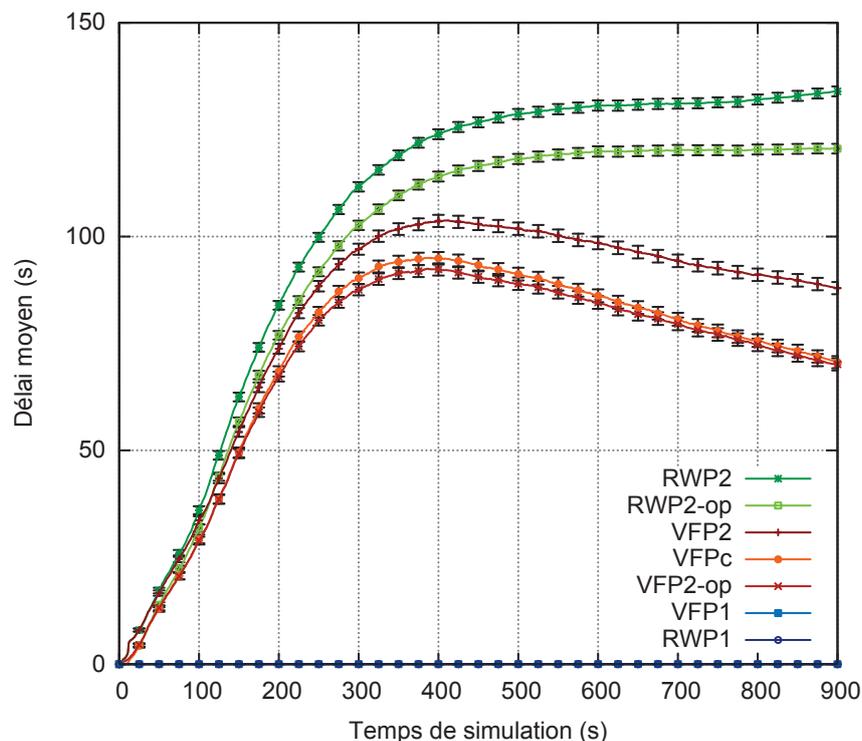


FIGURE 6.6 – Délai moyen de bout-en-bout relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de trafic de destination D en provenance du nœud de trafic source S, selon le temps t de simulation. $N = 15$.

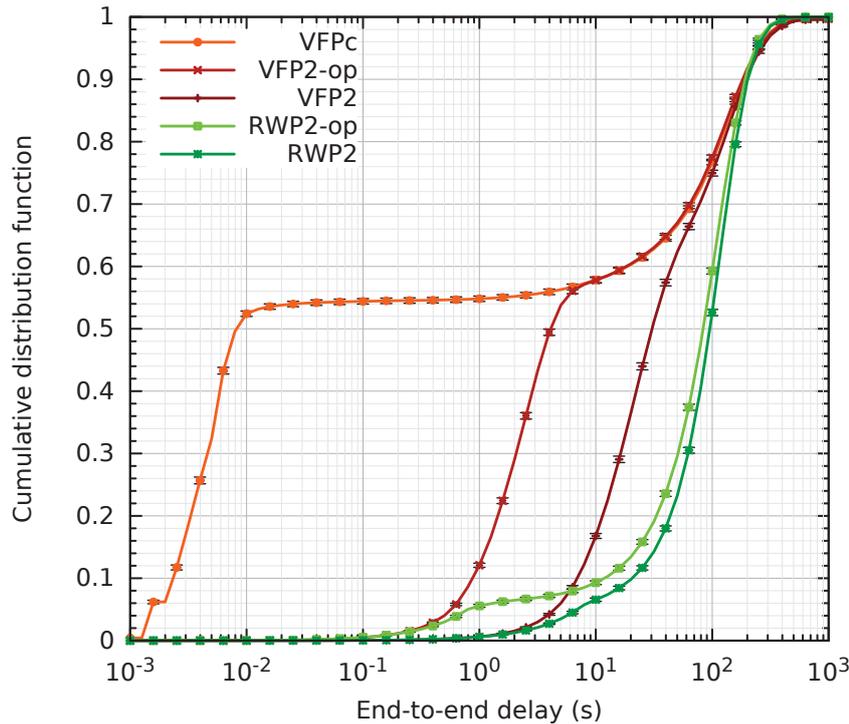


FIGURE 6.7 – Fonctions de Distribution Cumulative (CDF) relative aux délais de bout-en-bout, pour 5 agencements. $N = 15$.

cun paquet n'est reçu en moins de 100 ms pour VFP2-op, c'est plus de 54% du trafic considéré qui l'est avec VFPC. De manière encore plus significative, deux régimes peuvent être observés à partir de la courbe de CDF de VFPC : en effet, 52% du trafic utilisateur est reçu de manière synchrone, c'est-à-dire dans les 10 ms, via les chaînes de communication VFP, tandis que le reste du trafic est reçu de manière asynchrone, avec des délais supérieurs à 1 s, via des échanges opportunistes s'appuyant sur la pile de routage DTN épidémique. Ceci confirme l'intérêt de mettre en place les principes de mobilité contrôlée, tels que nous les avons décrits dans les chapitres précédents : avec VFPC, autant de trafic que possible est reçu avec des délais faibles lorsqu'une route de bout-en-bout est pleinement constituée le long d'une chaîne de communication VFP à saut multiples, tandis que le reste du trafic est acheminé au moyen de réplication de paquets, avec des délais moyens naturellement plus importants.

Impact de la mobilité des nœuds de surveillance

En ce qui concerne la mobilité des nœuds de surveillance, il est important de souligner que ces derniers ne doivent pas, dans les déploiements réseau considérés, être seulement perçus comme des nœuds-relais potentiels en attente d'insertion dans des chaînes de communication VFP. En effet, en parcourant la zone d'exploration, ils récoltent et disséminent également des informations récentes sur les autres nœuds du réseau, en particulier sur les nœuds de trafic dont les coordonnées, comme expliqué dans la Sous-section 3.1.3, jouent un rôle considérable dans le calcul des forces d'alignement. La fonction d'exploration jouée par les nœuds de surveillance a donc un effet bénéfique sur l'aptitude des nœuds-relais à disposer de coordonnées sur les autres nœuds aussi récentes que possible, de manière à ce que ces nœuds-relais puissent précisément estimer les forces virtuelles appliquées et ainsi former rapidement la topologie réseau attendue.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés jusqu'alors dans ce chapitre à la stratégie de mobilité contrôlée des nœuds-relais, et avons supposé pour les nœuds de surveillance un simple motif de mobilité aléatoire de type *RWP*. Cette approche nous a permis d'aboutir à l'analyse des avantages qu'apporte un agencement tel que VFPC. Cependant, nous avons également souhaité étudier l'impact d'une plus grande capacité des nœuds de surveillance à collecter des d'informations récentes sur les autres nœuds du réseau, en faisant en sorte que ces nœuds, pris collectivement à chaque instant du déploiement, puissent couvrir une surface plus importante, et ainsi disposer d'une plus grande aptitude à collecter et disséminer les informations évoquées. Pour ce faire, nous avons examiné, dans des conditions de simulation identiques, la performance d'une extension de VFPC pour laquelle ces nœuds s'appuient sur des forces répulsives, comme évoqué dans la Sous-section 6.1.2, afin que chaque nœud de surveillance soit doté de la capacité de repousser les autres nœuds de surveillance situés dans leur voisinage. Avec cette stratégie, les nœuds de surveillance sont initialement dotés d'une vitesse initiale au moyen d'un motif de mobilité *RWP*, en début de simulation, comme pour les autres agencements. Cependant, par la suite, dans le cadre de l'extension considérée, les nœuds de localisation ne sont plus soumis qu'aux forces répulsives précédemment décrites. À cause de cette combinaison entre motif de mobilité initial aléatoire et motif de mobilité contrôlée par forces répulsive dans les autres instants du déploiement, nous avons nommé cette extension VFPC-RRM, c'est-à-dire la stratégie issue de VFPC et dotée d'une mobilité aléatoire-répulsive (*random-repulsive mobility*).

Des simulations supplémentaires ont donc été effectuées afin de pouvoir comparer la performance de VFPC et de son extension, VFPC-RRM. La Fig. 6.8 donne une illustration des résultats comparés de ces deux agencements, en termes de PDR et de délai de bout-en-bout, selon le temps t de simulation. Bien que les PDR obtenus soient quasiment identiques, les délais eux diffèrent, avec un avantage modeste mais concret pour VFPC-RRM. En effet, le délai de bout-en-bout, dès que le temps de simulation atteint $t \approx 400$ s, est réduit pour VFPC-RRM d'environ 6% (c'est-à-dire environ 4 s), par rapport à celui de VFPC. De plus, la Fig. 6.9 montre qu'environ 2% des paquets de données CBR sont reçus plus tôt avec VFPC-RRM. En conséquence, au lieu d'être principalement stockés en mémoire persistante, transportés et potentiellement transmis par les nœuds de surveillance, ces 2% de paquets considérés sont acheminés le long des chaînes de communication VFP. Avec VFPC-RRM, ces chaînes sont de fait susceptibles d'être établies avec une plus grande probabilité, grâce au motif de mobilité aléatoire-répulsif des nœuds de surveillance qui permettent d'explorer plus de surface avec le même nombre de nœuds, et donc plus d'informations récentes sur, en particulier, les nœuds de trafic.

6.2.6 Enseignements

Dans ce chapitre, nous avons cherché à évaluer l'intérêt d'intégrer une solution de routage DTN aux stratégies de mobilité contrôlée que nous avons étudiées au Chapitre 5, basées alors exclusivement sur un routage de type MANET. Nous avons ainsi eu dans ce Chapitre 6 l'occasion d'étudier diverses manière d'intégrer des mécanismes DTN dans une stratégie de mobilité contrôlée s'appuyant sur des forces virtuelles.

Une première approche a naturellement été de substituer au routage MANET OLSR un routage DTN, ce que nous avons fait ici en adaptant plusieurs stratégies, disposant du support de forces virtuelles ou non, afin d'utiliser un routage épidémique. Or, nous avons pu vérifier, à travers une série de simulations effectuées dans des conditions similaires à celles du chapitre précédent, que nous obtenions dans ce cas des résultats de performance mitigés, en termes de PDR et de délai de bout-en-bout. En effet, avec cette approche de substitution du principe de routage, l'augmentation du taux de délivrance

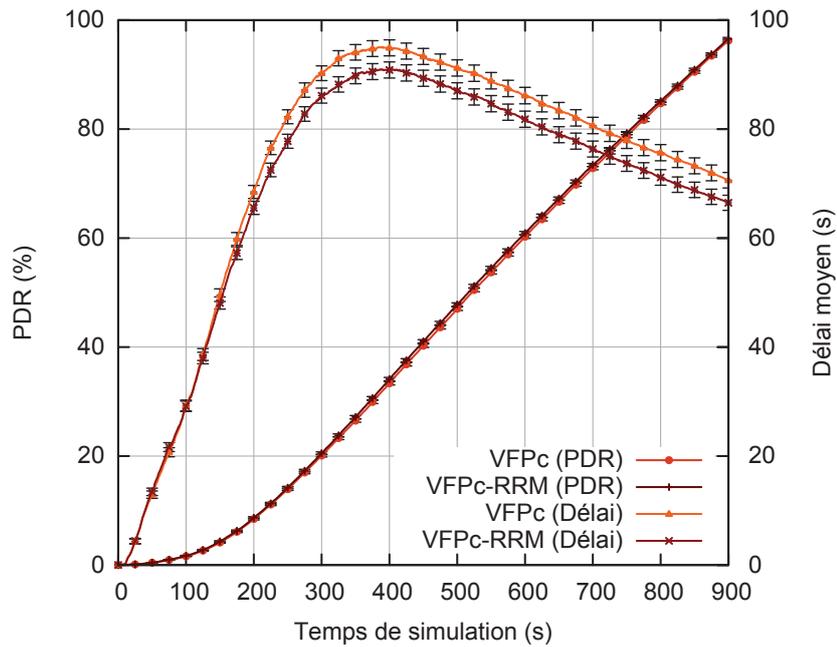


FIGURE 6.8 – PDR et délai de bout-en-bout relatifs aux paquets CBR reçus par le nœud de trafic de destination D en provenance du nœud de trafic source S, selon le temps t de simulation, pour VFPC et VFPC-RRM. $N = 15$.

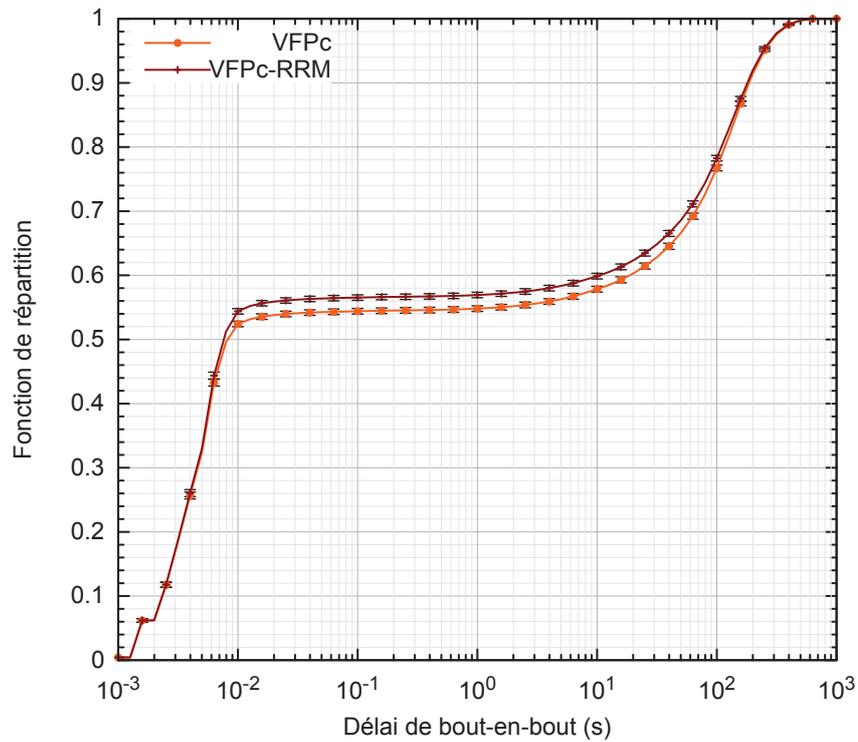


FIGURE 6.9 – Fonction de répartition (CDF) du délai moyen relatif aux paquets CBR reçus par le nœud de trafic de destination D en provenance du nœud de trafic source S, pour VFPC et VFPC-RRM, $N = 15$.

des paquets utilisateurs, passant d'au mieux 35% tel que relevé dans le Chapitre 5 à plus de 80% pour 15 nœuds de surveillance ici, voire à plus de 96% pour 30 nœuds, est certes très significative. Mais en revanche, comme l'on peut s'y attendre, cette augmentation importante du PDR est réalisée au détriment d'une augmentation tout aussi importante des délais. Plus précisément, nous avons pu constater que l'utilisation du seul routage DTN épidémique dans nos stratégies implique que non seulement les délais de bout-en-bout de la fraction des paquets qui n'auraient pas été transmis avec le routage MANET OLSR sont relativement importants, avec des valeurs majoritairement comprises entre 10 s et 400 s dans nos conditions de simulation, mais qu'également, la fraction des paquets qui étaient déjà transmis avec succès au moyen d'un simple routage MANET le sont ici avec des délais considérablement allongés également, même si la topologie réseau est telle que ces paquets pourraient potentiellement être transmis plus rapidement, le long d'une route à saut multiple établie. Cette observation s'explique aisément dans la mesure où le protocole DTN épidémique utilisé dans l'ensemble des agencements évalués n'est pas conçu pour transmettre des paquets de données de manière synchrone : en effet, avec cette solution de routage, la transmission des paquets de données utilisateur est conditionnée par l'échange de paquets de contrôle spécifiques, les messages *summary vector exchange*, qui permettent aux nœuds d'échanger leurs paquets de données disjoints lors des contacts, sans avoir à transmettre des paquets utilisateur inutiles pour la destination, comme souligné dans la Sous-section 6.2.3. Ainsi, à moins de réduire la période d'envoi de ces échanges de manière irréaliste, puisque ces messages échangés en masse deviendraient une source de surcoût hautement dommageable pour l'utilisation efficace des ressources de communication disponibles, il n'est pas envisageable de faire relayer par cette solution les paquets utilisateur de manière immédiate, c'est-à-dire sans leur stockage en mémoire persistante avant transmission, même si une route à sauts multiples est pourtant disponible le long d'une chaîne de communication VFP établie.

Dans ce contexte, nous avons ici cherché à permettre à notre solution de mobilité contrôlée de pouvoir distinguer deux régimes spécifiques de fonctionnements des nœuds-relais lorsque ceux-ci doivent relayer des paquets de données utilisateur : savoir transmettre ceux-ci de manière immédiate sans stockage en mémoire persistante lorsqu'une chaîne de communication VFP est disponible, ou les transmettre au moyen de la pile de routage DTN épidémique, dans des délais plus longs, autrement. Nous avons ainsi conçu VFPC, une stratégie de mobilité contrôlée s'appuyant non seulement sur des mécanismes de forces virtuelles, mais aussi sur un principe de double composant de routage. Ce double composant permet à VFPC de passer contextuellement d'un routage MANET à un routage DTN épidémique, et inversement, selon qu'une chaîne de communication VFP est constituée ou non. Nous avons évalué cette stratégie à travers un ensemble de simulations qui a confirmé que l'usage de tels mécanismes apportait un gain de performance significatif en comparaison des autres stratégies ne mettant pas en œuvre ce double composant de routage. Plus précisément, VFPC bénéficie d'abord de la mise en place de sa pile de routage DTN pour très significativement améliorer le taux de délivrance des paquets utilisateur. Mais contrairement aux autres stratégies mettant en œuvre uniquement un routage DTN, VFPC permet de limiter l'augmentation du délai de bout-en-bout moyen relatif à ces paquets, en pouvant basculer sur un routage MANET lorsqu'une route entre les nœuds de trafic est identifiée, le long d'une chaîne de communication VFP constituée. Le gain de performance est ici particulièrement visible et augmente significativement au fur-et-à-mesure du déroulement des simulations. Plus encore, une analyse de la répartition des délais de bout-en-bout montre, parmi les diverses stratégies étudiées, que VFPC offre les résultats les plus intéressants. En effet, avec cette stratégie, plus de la moitié du trafic CBR est reçu, dans nos conditions de simulation, de manière synchrone, c'est-à-dire dans les 10 ms, grâce à l'établissement de chaînes de communi-

cation VFP, tandis que le reste du trafic est reçu de manière asynchrone, avec des délais supérieurs à 1 s, via des échanges opportunistes s'appuyant sur la pile de routage DTN épidémique.

Concrètement, la mise en place d'une double pile de routage telle que nous l'avons présentée dans ce chapitre au moyen d'un cadre protocolaire inter-couches, n'est pas une condition absolument nécessaire à la mise en œuvre de la stratégie VFPC. En effet, un protocole de routage peut être capable de fonctionner à la fois en mode synchrone et en mode asynchrone, en vérifiant en particulier l'existence de routes à sauts multiples vers une destination avant de stocker en mémoire persistante les paquets de données ne pouvant immédiatement être transmis. C'est généralement le cas de solutions dites hybrides MANET/DTN [109], dont l'objectif est de pouvoir basculer d'un paradigme de routage à l'autre grâce à leur connaissance du contexte relatif à l'état des routes dans le réseau. Parmi ces solutions, beaucoup fonctionnent sur le principe du test de l'existence d'une route vers la destination avant de choisir si un paquet doit être transmis le long de cette route ou stocké avant une prochaine opportunité de transmission. C'est notamment le cas d'études ayant visé l'extension du protocole MANET OLSR avec des capacités de mise en tampon des paquets selon ce principe [110, 111, 112]. Il est cependant utile de souligner qu'en termes de déroulement de la logique de routage lorsqu'un paquet de données doit être traité pour transmission ou stockage, notre cadre protocolaire inter-couches donne une description architecturale de haut niveau, pouvant correspondre tout aussi bien en termes d'implémentations à une mise en œuvre de deux piles de routages physiquement distinctes, que de deux composants logiques cohabitant au sein de la même solution de routage. De ce point de vue, les solutions hybrides MANET/DTN précédemment citées partagent avec la double pile de routage utilisée par VFPC la même capacité à basculer contextuellement d'un paradigme de transmission de paquets à l'autre, et illustrent deux mises en œuvre possibles du cadre protocolaire inter-couche tel que nous l'avons présenté dans ce chapitre.

Pour autant, il faut également constater que les études liées aux solutions hybrides MANET/DTN citées sont sévèrement contraintes par le fait que les MANET sont généralement peu adaptés pour des scénarios de déploiement en situation de densité de nœuds trop faible et de connectivité réseau intermittente, comme nous l'avons souligné dans la Section 6.1. Cette observation permet de mesurer la différence avec notre solution de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles, qui apporte intrinsèquement, par la possibilité d'auto-déplacement des nœuds afin de former les topologies désirées, les conditions réseau favorables à l'émergence d'un avantage objectif à utiliser l'un ou l'autre des paradigmes de routage, à des temps différents du déploiement. Plus concrètement, les mobilités contrôlées utilisant le protocole VFP que nous avons proposées, comme l'agencement VFPC, sous-tendent l'adoption d'un comportement collectif émergent amenant la formation de chaînes de communications VFP, et donc la perspective de disposer de manière déterministe de périodes de déploiement pendant lesquelles un type de routage apportera plus de bénéfices que l'autre. Au contraire, en ce qui concerne les solutions hybrides MANET/DTN évoquées, celles-ci doivent s'appuyer sur des éléments extrinsèques afin que le basculement d'un paradigme de routage à un autre offre un réel intérêt. Ici en effet, ce basculement est réalisé sur la base de l'observation de l'environnement externe aux nœuds et de la topologie réseau que ceux-ci perçoivent, dans un contexte de mobilité subie et non contrôlée. Ainsi, les travaux mentionnés ont du être structurés par la nécessité de modéliser des seuils théoriques, par exemple basé sur l'expression d'une probabilité de succès de transmission [109] ou à l'inverse d'échec de transmission [112], caractérisant la connectivité réseau, permettant de définir les conditions externes pendant lesquelles il est plus pertinent d'utiliser un routage MANET ou au contraire DTN. Une autre voie choisie dans ces travaux a été de restreindre l'ensemble des scénarios de déploiement ap-

plicables, de manière à ce que ceux-ci garantissent que l'utilisation de l'un et l'autre des paradigmes de routage puisse offrir un avantage, à des temps de déploiement différents. Par exemple, le déploiement défini dans l'étude [111], qui s'effectue dans un contexte de service d'urgence en situation de post-désastre, est facilité par une densité de nœuds importante mais en contrepartie rendu plus difficile par la présence d'obstacles sur le terrain provoquant un partitionnement supplémentaire du réseau. Néanmoins, des nœuds dotés d'un motif de mobilité adapté au contexte (*disaster area mobility model* [113]) peuvent jouer le rôle de porteurs de paquets de données et permettent au final une circulation des données entre zones partitionnées, pour autant que la solution hybride sache basculer correctement vers le protocole de routage le plus adapté. Une approche similaire a consisté à restreindre les études aux scénarios définissant explicitement, à des endroits différents de la surface de déploiement considérée, des zones à faible densité de nœuds et d'autres à forte densité de nœuds [109], simplifiant grandement le problème, mais également au détriment de la diversité des scénarios de déploiement envisagés et donc du caractère universel des solutions proposées.

Une autre considération relative à la mise en œuvre de la stratégie VFPC mérite d'être soulignée : en pratique, le code de simulation de cet agencement a été conçu de telle manière que le composant RSS contienne la réalisation du protocole de routage saut-par-saut synchrone, que nous avons développé en tant qu'extension du protocole DTN épidémique pour les besoins spécifiques de l'évaluation menée dans ce chapitre. Bien que respectant l'approche du cadre protocolaire inter-couches illustré dans la Fig. 6.1, il n'existe donc physiquement dans VFPC qu'une unique pile de routage mettant en œuvre les deux paradigmes de routage ainsi que la fonction de sélection de la pile de routage la plus adaptée au contexte, cette fonction interagissant avec le composant VFP pour récupérer les informations de contexte afin de réaliser cette sélection. On notera que nous avons choisi de simplifier l'extension de routage saut-par-saut réalisée, en ne développant que les fonctions principales liées aux conditions de mise en mémoire persistante de paquets ne pouvant pas être immédiatement transmis, ainsi que celles liées aux critères de transmission des paquets précédemment placés en mémoire persistante. Nous avons par exemple omis à dessein d'insérer une fonction de vérification de boucle. En effet, les nœuds disposant d'une mobilité contrôlée, la formation des routes le long des chaînes de communication VFP permet d'aboutir à des topologies dans lesquelles les situations de mauvaise construction des routes est très peu probable. C'est une différence notable avec une solution devant être déployée dans une situation de mobilité aléatoire, prédite ou plus généralement subie, qui nous a permis de simplifier le code de l'entité de routage saut par saut, sans pour autant affecter les performances observées de l'agencement VFPC.

Ainsi, avec VFPC, une partie du trafic utilisateur est reçue de manière synchrone, lorsqu'une route de bout-en-bout est pleinement constituée le long d'une chaîne de communication VFP, tandis que le reste du trafic est acheminé de manière asynchrone, au moyen du protocole DTN. Ce comportement pourrait permettre de reconsidérer les conclusions d'études qui se sont également intéressées à l'opportunité d'adapter les mécanismes applicatifs à des besoins utilisateurs concrets dans un contexte de réseau difficile. Par exemple, l'étude de Cabrero [114] a d'une part montré l'intérêt, dans une situation d'urgence nécessitant la participation d'équipes de secours, de disposer à distance depuis le centre de commandement et de contrôle d'une transmission vidéo permettant d'évaluer la progression des équipes sur le site d'intervention. Dans ces conditions, la bonne conduite des opérations de secours requiert la réception de ce type de contenu, avec une forte acceptation que la qualité d'expérience à distance, c'est-à-dire la réception d'une diffusion vidéo dégradée tant sur le plan de la qualité que de la chronologie, puisse être amoindrie car sujette à des délais considérablement fluctuants provoqués par la nature

intermittente des liaisons de communication du réseau déployé sur le lieu de l'intervention. D'autre part, cette même étude propose un mécanisme protocolaire de diffusion vidéo adapté aux conditions rencontrées dans les réseaux difficiles, avec toutefois l'hypothèse contraignante que les mobilités subies des nœuds ne permettent pas ici d'envisager qu'il existe des périodes de temps de durée significative pendant lesquelles des routes de bout-en-bout sont établies entre les nœuds source et destination de ce flux vidéo. En revanche, l'utilisation que nous faisons des principes de mobilité contrôlée avec VFPC offre la perspective que dans des conditions de déploiement similaires, une application contextuellement informée des temps auxquels elle rentre dans un mode de communication synchrone ou asynchrone puisse offrir de nouvelles possibilités en termes d'expérience utilisateur, en dépit de conditions d'utilisation du réseau difficiles.

En complément, nous avons également vérifié que les délais observés lors de l'utilisation d'une stratégie de mobilité contrôlée diminuent encore un peu plus lorsque les nœuds de surveillance sont soumis à des forces virtuelles de nature répulsive, au lieu de suivre un motif de mobilité purement aléatoire, de type [RWP](#). Cette optimisation simple de la stratégie VFPC permet d'obtenir, en définitive, un léger mais tangible gain de performance supplémentaire, sans inconvénient identifié.

Chapitre 7

Choix architecturaux

Sommaire

7.1 Contexte et choix de mise en œuvre	104
7.1.1 Le contexte des plate-formes aériennes	104
Taxonomie	104
Historique et perspectives applicatives	106
7.1.2 Sélection d'une plate-forme adaptée à l'expérimentation	108
7.1.3 Spécification de l'architecture matérielle des nœuds	109
7.1.4 Principaux composants logiciels déployés	111
7.1.5 Phases de mise en œuvre, intégration et validation	112
7.2 Résultats d'expérimentation attendus	113

7.1 Contexte et choix de mise en œuvre

Dans les chapitres précédents, nous avons à de nombreuses reprises supposé qu'une grande partie des nœuds mobiles utilisés dans nos scénarios réseau devaient être dotés d'une capacité de propulsion autonome, afin de pouvoir mettre en œuvre les principes de mobilité contrôlée. De plus, nous avons également présumé que ces nœuds devaient être capables de se mouvoir aisément dans de multiples (voire toutes les) directions, sans que les obstacles présents sur les zones de déploiements ne puissent constituer une contrainte insurmontable à la mobilité de ces nœuds. Enfin, nos scénarios réseaux des chapitres 4, 5 et 6 se sont appuyés sur l'hypothèse que les nœuds mettant en œuvre les stratégies de mobilité contrôlée étudiées devaient être dotés d'une capacité d'emport adaptée, afin d'embarquer les systèmes de télécommunications requis, et en outre être capables de développer une puissance de calcul suffisante pour exécuter les algorithmes et autres flots de logiques de services.

Afin de répondre à ces besoins système, nous avons donc, tout au long de notre étude, porté un intérêt particulier aux plate-formes aériennes de basse altitude fortement mobiles de type UAV. Celles-ci, en effet, possèdent l'aptitude de se déplacer facilement selon de nombreux degrés de liberté tout en pouvant embarquer une charge utile de télécommunications. De plus, l'essor des UAV civils et récréatifs a favorisé l'émergence d'une grande diversité de composants matériels pour ces systèmes, facilitant la conception d'UAV disposant d'une capacité de calcul suffisante pour exécuter l'ensemble des algorithmes requis pour le déploiement des stratégies de mobilité contrôlée considérées précédemment.

Dans ce chapitre, nous allons détailler concrètement, dans la Sous-section 7.1.1, le contexte des plate-formes aériennes, en commençant par donner une taxonomie des UAV ainsi qu'un bref historique soulignant la maturation technique et économique progressive de ces systèmes. Puis nous nous intéresserons aux besoins spécifiques issus des scénarios réseau des chapitres 4, 5 et 6, et détaillerons sous cet angle notre approche de sélection d'une plate-forme répondant à l'ensemble de ces besoins, dans la Sous-section 7.1.2. Une fois le choix de notre cible architecturale expliqué, nous détaillerons cette dernière sous les angles matériel et logiciel, respectivement dans les Sous-sections 7.1.3 et 7.1.4. Enfin, la Sous-section 7.1.5 sera l'occasion d'aborder la problématique d'assemblage, d'intégration et de validation d'un UAV adapté à l'ensemble des besoins exprimés dans les scénarios réseau présentés dans les chapitres précédents.

7.1.1 Le contexte des plate-formes aériennes

Taxonomie

Indépendamment de toute considération de taille, fonctionnalités et utilisations attendues, deux grandes classes d'aéronefs sans équipage peuvent être distinguées, comme l'illustre la Fig. 7.1 : les véhicules aériens de type aérodyne, et les aérostats. Alors que les aérodynes sont plus lourds que l'air et s'appuient sur les principes aérodynamiques de portance, obtenue par l'utilisation d'ailes fixes ou de voilures tournantes, les aérostats eux assurent leur sustentation en étant plus légers que l'air. Des exemples d'aérodynes sont les planeurs, dépourvus de moteurs, des avions, des véhicules dotés de rotors (ex. hélicoptères, autogyres et multi-rotors) ainsi que d'autres véhicules reposant sur d'autres principes dynamiques de portance, comme les ornithoptères, qui utilisent le mécanisme biomimétique du battement d'aile. Au contraire, les aérostats comprennent des véhicules souvent portés par des enveloppes remplies d'un gaz plus léger que l'air (ex. hydrogène, hélium et air chaud), comme les ballons et les dirigeables. Ceux-ci peuvent soit librement dériver, soit être propulsés ou encore rester captifs (c'est-à-dire retenus au sol par un

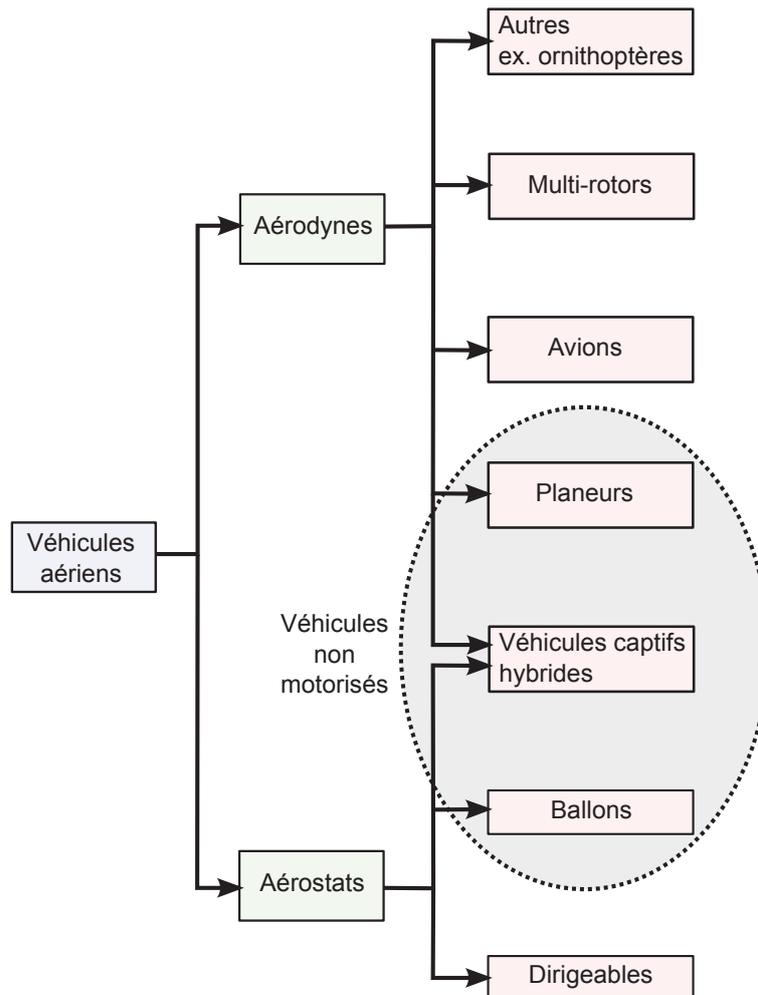


FIGURE 7.1 – Taxonomie simplifiée des véhicules aériens de type aérostat et aérodyne

câble). Enfin, il existe des aéronefs empruntant à la fois aux principes aérodynamiques des aérostats et des aérodynes : ces véhicules hybrides peuvent donc profiter à la fois de la portance aérostatique (c'est-à-dire due au fait pour ces aéronefs d'être plus légers que l'air) et de la portance fournie par leurs voilures respectives. À titre d'exemple, le projet Européen FP7 ABSOLUTE a réalisé ses démonstrations de déploiement de réseau LTE d'urgence en situation de désastre au moyen de ballons captifs hybrides [115]. Les aéronefs hybrides utilisés, possédant en plus de leur enveloppe gonflée à l'hélium une aile de type cerf-volant, sont parfois appelés *kytoon*, contraction de *kite-balloon*, et offrent de par leur profil aérodynamique spécifique une stabilité améliorée en conditions de vents modérés.

En termes d'utilisation autonome de ces aéronefs (ou au contraire de présence d'un équipage), plusieurs des véhicules les plus larges peuvent être utilisés avec ou sans équipages. Il s'agit en particulier des dirigeables, ballons, planeurs, avions, hélicoptères et autogyres. En revanche, les aéronefs aux dimensions les plus modestes, comme les drones civils et récréatifs de type multi-rotors, sont exclusivement utilisés pour des missions autonomes et rentrent systématiquement dans la catégorie des UAV.

Une autre approche de classement de ces aéronefs, au delà de leur caractère plus lourd (ou plus léger) que l'air, réside dans l'altitude à laquelle ces plate-formes évoluent lorsqu'elles sont dotées d'une charge utile de télécommunications et elles sont en fonctionnement. À cet égard, deux classes principales de plate-formes peuvent être définies : les HAP, opérées dans un intervalle d'altitude de 17 à 25 km environ, correspondant à la

basse stratosphère. Puis, les **plate-formes de basse altitude (LAP)**, évoluant généralement dans un intervalle de quelques mètres à quelques kilomètres d'altitude.

Historique et perspectives applicatives

Pour ce qui est **des plate-formes évoluant à haute altitude**, la recherche sur les divers aspects des télécommunications a concrètement démarré dans la deuxième moitié des années 80, avec les efforts de prototypages de deux systèmes : le Pathfinder américain ainsi que le projet canadien SHARP [116]. En particulier, ce dernier s'est concrétisé par une campagne de tests, en 1987, d'un prototype de 4,5 m d'envergure dans la basse stratosphère. Plus tard, vers la fin des années 90, on a pu relever un nombre plus important de projets issus de pays différents, dont l'objectif était de tenter de résoudre ou tout au moins de traiter plus en profondeur une série de préoccupations clé, relatives à la performance des systèmes de communication dans la basse stratosphère, en particulier en termes de conception de système de communication sans fil efficace, de l'étude de la propagation radio à ces altitudes ainsi que des interférences potentielles avec les systèmes de communication terrestre et satellitaire. Le développement de charges utiles modulaires, à même d'offrir une certaine flexibilité du point de vue applicatif, a également alors été un axe de recherche important. Parmi ces projets, on peut retenir les résultats des projets européens FP5 HeliNet [117] et FP6 CAPANINA [118], qui ont examinés les problèmes précités en cherchant à donner aux **HAP** la capacité de fournir des liaisons sans fil à haut débit. De même, CAPANINA a étudié la conception d'antennes à faisceaux orientables, dans le contexte de différentes hypothèses en termes de motifs de mobilité pour les utilisateurs. Dans la même optique, aux USA, le programme ERAST [119] a permis d'initier le développement de plusieurs avions stratosphériques sans équipage tels que Pathfinder+, une version mise à jour du Pathfinder déjà mentionné, s'appuyant sur l'utilisation de panneaux photovoltaïques. Ce modèle pu réaliser plusieurs campagnes de test à une altitude de 24,4 km en 1998. Dans la même période, la NICT Japonaise a conduit des tests plus élaborés avec Pathfinder+ [120] concernant les communications sans fil 3G ainsi que la diffusion télévisuelle au moyen du format **de télévision haute définition (HDTV)**. Le programme ERAST a également permis de concevoir et tester un avion solaire sans équipage utilisant une pile à hydrogène, Helios, qui après l'arrêt de son programme a été suivi par le prototype Global Observer de l'américain AeroVironment Inc, à l'échelle $\frac{1}{5}$, qui a volé pour la première fois en 2005 et donc l'utilisation du système de pile à combustible a pu être déployé et testé en 2011 [121].

C'est à partir de 2013 que les efforts de prototypage des **HAP** s'accroissent nettement, avec l'entrée d'entreprises privées issues de l'écosystème Internet disposant d'une capacité d'investissement conséquente. Les entreprises Google et Facebook, en particulier, ont cherché depuis cette date à évaluer, à travers diverses conceptions d'aéronefs et leur évaluation lors de déploiements en conditions réelles, la performance et le coût de ces plate-formes, afin de pouvoir couvrir les populations rurales ou reculées non encore connectées à l'Internet par les réseaux terrestres traditionnels. Ainsi, le projet Loon de Google examine les problèmes relatifs au vol stratosphérique avec une approche combinant des aérostats individuellement peu coûteux et dispensables ainsi que l'absence de toute capacité de propulsion [122]. Les ballons Loon adoptent ainsi une trajectoire dérivante au gré des vents dominants de la basse stratosphère. Cependant, la présence d'une double enveloppe (l'enveloppe interne étant remplie d'hélium, l'enveloppe externe, surpressurisée, contenant de l'air) et d'un compresseur alimenté par des panneaux photovoltaïques, donne la capacité au ballon de changer d'altitude pour atteindre des vents d'altitude de direction spécifique, permettant à ces engins de mettre en œuvre une mobilité contrôlée relâchée, au sens que la précision liée au contrôle de trajectoire reste faible

et basé sur un modèle météorologique prédictif de la basse stratosphère devant être suffisamment précis. Depuis 2013, de nombreux essais de fourniture de réseau LTE ont été réalisés dans divers pays. Afin d’obtenir un contrôle de trajectoire plus précis, Google, Facebook et Airbus, à travers leurs plate-formes respectives Titan Solara, Ascenta Aquila et Qinetiq Zephyr, ont tous trois séparément conçu des avions solaires sans équipage, capables de rester en vol en haute altitude pendant plusieurs semaines d’affilée. A la date de rédaction de ce manuscrit, à l’exception du Zephyr d’Airbus dont certains modèles ont déjà dépassé le stade du prototypage et sont déjà employés dans un contexte militaire, les autres HAP sont toujours en période de conception et de tests, sans perspectives de déploiement commercial clairement définies [123].

En ce qui concerne **les plate-formes de basse altitude**, elles ont depuis longtemps de nombreuses applications militaires [124], grâce en particulier à leur capacité de furtivité à très basse altitude, et leur caractère relativement dispensable, en comparaison d’une part à des aéronefs avec équipage, et d’autres par à des engins plus complexes et coûteux, évoluant à plus haute altitude. Cependant depuis quelques années, c’est dans le contexte du domaine civil que les perspectives applicatives des LAP se sont rapidement multipliées. Un intérêt croissant s’est en effet manifesté sur des domaines aussi variés que la reconnaissance photographique ou plus généralement sur la base de capteurs multispectraux, la surveillance du trafic urbain en basse altitude [125], les communications d’urgence dans les situations de post-désastre ou les divers événements non planifiés [4, 79, 90, 92, 93, 115], l’agriculture de précision [126], l’inspection de voies ferrées [127], oléoducs, et autres installations ou infrastructures industrielles, le transport de médicaments et autres livraisons de colis, etc. En se référant de nouveau à la Fig. 7.1, plusieurs facteurs de forme principaux peuvent être distingués dans le contexte de la basse altitude :

- Tout d’abord, dans la classe des aérostats, les engins captifs (c’est-à-dire retenus au sol, voire reliés à un réseau ou alimentés électriquement, par un ou plusieurs câbles) sont plus répandus que les aéronefs auto-propulsés, comme les dirigeables. En effet, les aérostats captifs sont largement moins complexes à déployer (on notera cependant que, dans le contexte de la régulation aérienne de nombreux pays, un équipage complet est requis, dans l’appareil ou au sol s’il s’agit d’un engin autonome). De plus, un câble d’amarrage peut mécaniquement aider à stabiliser un aérostat de basse altitude dans le contexte de vents fluctuants [122, 128]. En outre, les aérostats captifs offrent l’avantage de pouvoir être dotés d’un câble d’alimentation électrique ou de liaisons filaires qui sont généralement attachés à, ou enroulés autour du câble d’amarrage. Il faut cependant noter qu’un engin captif peut aussi être doté d’un système de propulsion, lui permettant d’effectuer d’autres missions de nature différente à d’autres moments, avec ou sans son câble d’amarrage, en tant que dirigeable ou ballon autopropulsé, pouvant n’être captif qu’épisodiquement au cours de son déploiement [129].
- Deuxièmement, les UAV de type multi-rotor ou à aile fixe, communément appelés drones, sont ceux les plus répandus en tant qu’aérodynes de basse altitude. Mis à part les distinctions résultant des différents principes de portance (du fait que celle-ci est généralement basée sur une voilure fixe ou tournante [130]), ces UAV affichent de nombreux caractères distinctifs tels que la taille, l’autonomie, et la capacité d’emport (c’est-à-dire la masse de la charge utile, en général de télécommunications, pouvant être portée par le drone considéré). À ce titre, une sous-catégorie d’UAV de petite taille a été dénommée **micro-aéronef sans équipage (MUAV)** [124] ou plus communément **micro-aéronef (MAV)**, et regroupe l’ensemble des petits drones civils ou récréatifs pesant de quelques centaines de grammes à quelques kilogrammes.

Ces engins sont utilisés de manière croissante en tant qu'objet d'étude ou facilitateurs d'expérimentation, dans des cas d'usage où les faibles capacités individuelles (notamment en termes d'autonomie et de capacité d'emport) sont contre-balançées par des coûts d'acquisition et d'utilisation généralement bien moins importants [131].

7.1.2 Sélection d'une plate-forme adaptée à l'expérimentation

De manière générale, l'objectif était ici de sélectionner des UAV qui puissent pleinement jouer le rôle des nœuds de poursuite, relais et surveillance tels que décrits dans les scénarios des Sections 4.2, 5.2 et 6.1.2. Une série de besoins a permis de rapidement orienter le processus de sélection vers la catégorie d'aéronefs la plus adaptée pour les besoins d'un déploiement cohérent avec l'environnement relatif aux scénarios mentionnés :

- Le souhait de disposer d'un nombre suffisant d'aéronefs relativement peu coûteux et peu complexes à déployer, et la constatation que le scénario de poursuite du Chapitre 4 nécessite que les aéronefs évoluent en basse altitude, ont permis d'écarter les HAP au profit des LAP. Pour les mêmes raisons, les MAV sont préférés aux UAV de plus grandes dimensions et les ornithoptères sont éliminés de la sélection, étant peu répandus et documentés (leur capacité d'emport étant de plus généralement assez faible).
- De plus, les modèles de mobilité dynamique des nœuds évoqués disqualifient tout à la fois les plate-formes captives, les véhicules non motorisés et les aérostats, dont les dynamiques de vol ne permettent pas en particulier des accélérations et vitesses cohérentes avec les hypothèses de simulation relatives aux scénarios des chapitres précédents. Il faut souligner également que les définitions des systèmes de forces, tels que décrits dans la Sous-section 3.1.4, sont intrinsèquement adaptés aux aéronefs capables de garder une position stationnaire et de voler à faible vitesse. On notera cependant les stratégies de mobilité définies aux chapitres précédent pourraient être adaptées aux contraintes de trajectoires des UAV incapable d'adopter un vol stationnaire, en les amenant par exemple à suivre des trajectoires circulaires le cas échéant.

En reprenant la taxonomie succincte illustrée par la Fig. 7.1, on constate que les critères de sélection évoqués amènent à préférer les UAV de type multi-rotor. Au-delà de ce choix de catégorie, une série de besoins matériels et logiciels peuvent être extraits des différents scénarios réseau et des diverses hypothèses effectuées à la conception ou pendant les phases de simulation des stratégies de mobilité contrôlée étudiées :

- Comme le montre, dans le Chapitre 6, la Fig. 6.1 représentant le cadre protocolaire inter-couches permettant en particulier de mettre en œuvre la stratégie VFPC, le composant de mobilité contrôlée interagit étroitement avec l'autopilote du multi-rotor, tout en étant, au moins dans la représentation architecturale qui en est faite dans la figure mentionnée, fonctionnellement distincte. Concrètement, la plate-forme cible doit être suffisamment ouverte, en termes matériel et logiciel, pour que les stratégies de mobilité contrôlée puissent être développées et déployées sur cette plate-forme. De plus, ces dernières doivent pouvoir interopérer avec un autopilote, qui, pour des raisons de simplicité de mise en œuvre et de performance, doit pouvoir être choisi parmi les produits du commerce, sans gros développement supplémentaire en ce qui concerne les interfaces par lesquelles devront interopérer les deux composants.
- Les nœuds de poursuite, évoqués dans le scénario du Chapitre 4, doivent disposer de capacité de vision par ordinateur [80, 81, 132] afin de détecter et suivre le marqueur des spécimens de *Vespa velutina* relâchés. Ce besoin fonctionnel implique

pour la plate-forme cible d'avoir une capacité d'emport de charge utile suffisante pour transporter une caméra adaptée à la poursuite, ainsi qu'une unité de traitement pouvant être celle identifiée précédemment pour la mise en œuvre des stratégies de mobilité. Cette unité de traitement devra disposer d'une puissance de calcul suffisante pour héberger les algorithmes nécessaires au support de la fonction de vision par ordinateur des nœuds de poursuite.

- L'autonomie des drones utilisés doit au moins égaler les temps de simulation relatives à la performance des stratégies de mobilité contrôlée étudiée, c'est-à-dire 900 s ou 15 mn. Bien que cette valeur soit facilement atteignable sur la grande majorité des multi-rotors du commerce, il faut noter que la source énergétique choisie doit pouvoir alimenter non seulement la chaîne de propulsion du drone et son autopilote, mais aussi la ou les unité(s) de traitement permettant de déployer les algorithmes de mobilité contrôlée et de vision par ordinateur.
- Pour des raisons de conformité à la régulation des drones sur le territoire métropolitain à la date de rédaction de ce chapitre, les MAV utilisés devront pouvoir basculer d'une planification de trajectoire autonome à un pilotage manuel, à distance.
- Enfin, la plate-forme choisie devra pouvoir envoyer la télémétrie du drone ainsi que les diverses données applicatives pertinentes à un nœud de contrôle, tel que défini dans la Sous-section 4.2.

7.1.3 Spécification de l'architecture matérielle des nœuds

La Fig. 7.2 donne une représentation simplifiée de l'architecture matérielle générale de la plate-forme cible, utilisée comme référence afin d'assembler les composants nécessaires à la mise en œuvre des nœuds de contrôle, relais et surveillance utilisés dans les scénarios de déploiement. Dans cette architecture, on peut distinguer trois sous-ensembles de composants :

La chaîne de traitement. Elle regroupe l'ensemble des capteurs et deux unités de traitement nécessaires à la mise en œuvre respective du contrôle autonome de vol et des stratégies de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles :

- L'autopilote est un [ArduPilotMega \(APM\) 2.6](#) [132], sélectionné pour sa conception *Open source* et sa capacité à être interconnecté, via un port série, à une autre unité de traitement [133]. L'APM est une carte contrôleur de vol répandue pouvant être déployée sur de nombreux types de véhicules autonomes comme des véhicules roulants, bateaux, avions, planeurs et multi-rotors (comme par exemple des {tri, quadri, hexa, octo}-coptères). Cet autopilote est abordable, répandu et relativement bien documenté. Il dispose en outre de données IMU [134] complètes issues de divers capteurs (en particulier gyroscope à 3 axes, accéléromètre, magnétomètre) afin de pouvoir évaluer la vitesse et l'attitude de l'aéronef, ainsi que les forces gravitationnelles appliquées. La connexion d'un système de [géopositionnement par satellite \(GPS\)](#) externe non représenté sur la Fig. 7.2 lui permet enfin de supporter les mécanismes de planification de trajectoire par points de référence (*waypoints*).
- Un [SoC Raspberry Pi](#) [79, 132] a été choisi en tant qu'unité de traitement pour la mise en œuvre des stratégies de mobilité contrôlée et des algorithmes de vision par ordinateur. De la même manière que la carte APM, le Raspberry Pi est une carte légère, disponible sous différents facteurs de forme avec des puissances de calcul différentes, répandue et abordable. On notera que pour les premières validations réalisées, c'est une caméra connectée au port [d'interface série pour caméra \(CSI\)](#) du Raspberry Pi qui est utilisée.

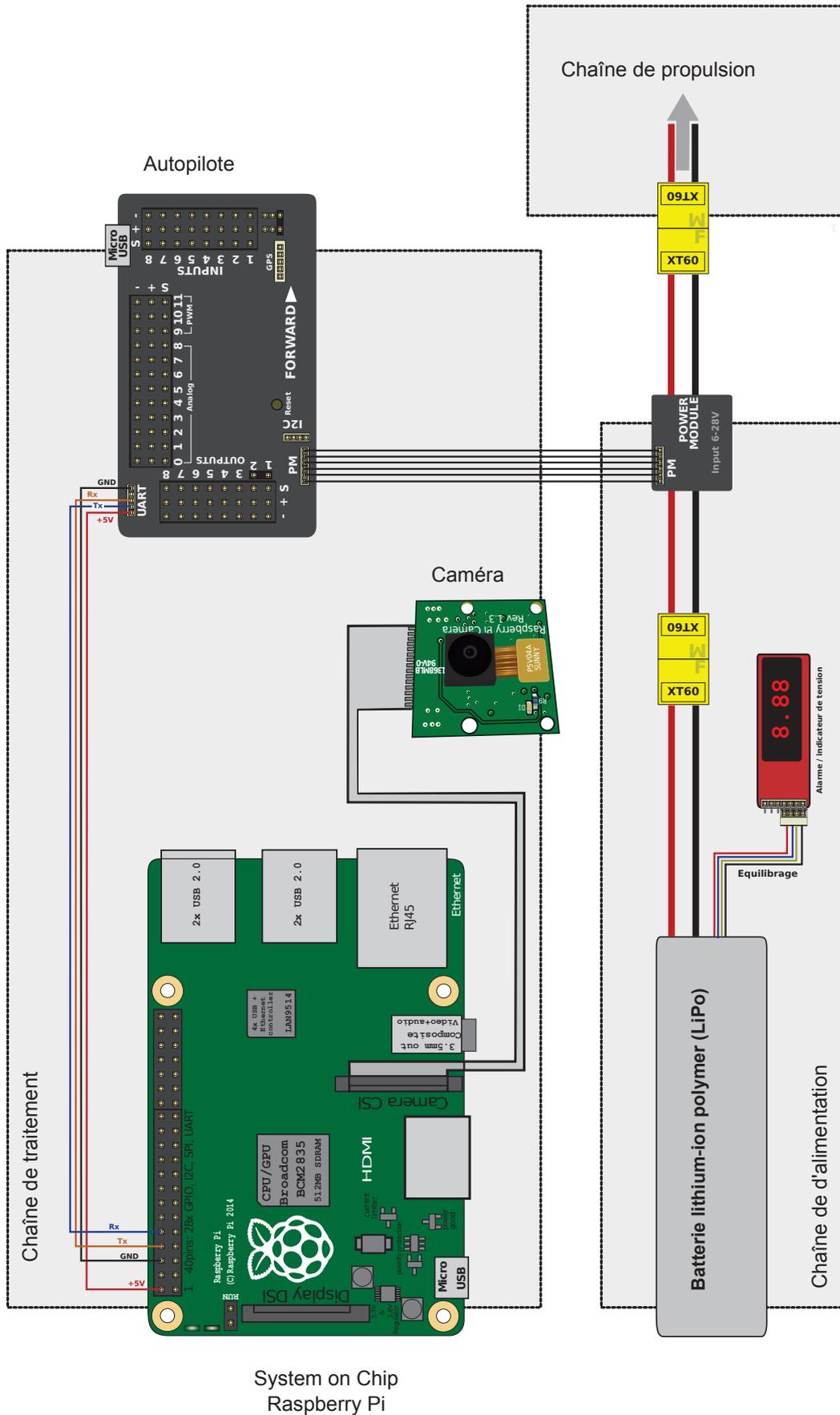


FIGURE 7.2 – Architecture matérielle générale de la plate-forme cible

La chaîne d'alimentation. Elle permet d'alimenter électriquement les chaînes de traitement et de propulsion. Elle est d'abord constituée d'une batterie **lithium polymer (LiPo)** offrant, par rapport à d'autres types d'accumulateurs, une forte densité énergétique pour un poids limité, ce qui en fait un choix très commun dans ce contexte de déploiement. De plus, ces types d'accumulateurs permettent une intensité de décharge importante, pour permettre aux moteurs d'atteindre leur pleine puissance, en phase d'accélération par exemple. Afin de pouvoir alimenter les divers sous-systèmes des chaînes évoquées, un circuit de distribution est utilisé. Il permet d'alimenter le contrôleur de vol **APM** avec une puissance régulée adéquate (5,37 V et 2,25 A) tandis que la chaîne de propulsion reçoit directement le courant non régulé issu directement de l'accumulateur **LiPo**. Il est intéressant de souligner que, tel que l'illustre la Fig. 7.2, le **SoC Raspberry** est alimenté via le contrôleur de vol. Néanmoins, cette configuration ne vaut que si l'utilisation applicative attendue sur le **SoC Raspberry** n'est pas trop intensive. C'est le cas par exemple des mises en œuvre des nœuds de surveillance et relais, où l'unité de traitement considérée est essentiellement utilisée pour la mise en place des stratégies de mobilité contrôlée. En revanche, une mise en œuvre d'un nœud de poursuite nécessitera le déploiement d'algorithmes de vision par ordinateur consommateurs en puissance de calcul. Dans ce cas, l'alimentation issue de la carte contrôleur étant régulée à 5 V et 500 mA, ce qui peut s'avérer insuffisant, le **SoC Raspberry** pourra être alimenté directement depuis la chaîne d'alimentation, via un **régulateur de tension (BEC)** adapté. Il est également recommandé de s'assurer de la présence d'un indicateur de tension, utilisé comme alarme, par exemple sur le port d'équilibrage de l'accumulateur **LiPo**. En effet, ce dernier est composé de différents éléments, appelés cellules, qui ont une chacun une tension nominale (généralement de 3,7 V) et un seuil de tension basse sous lequel ne pas descendre afin de ne pas endommager l'accumulateur. L'indicateur de tension permet de contrôler la tension de chaque cellule lors du déploiement de l'**UAV**, et joue le rôle d'alarme lorsque les tensions relevées sont proches du seuil mentionné.

La chaîne de propulsion. Ce sous-ensemble de l'architecture ne présente aucun caractère atypique. Dans la mesure où un quadricoptère permet ici de disposer d'une capacité d'export suffisante, la chaîne de propulsion est composée de 4 moteurs dits sans balais (*brushless*) chacun connecté à un **contrôleur électronique de vitesse (ESC)**. Ces derniers permettent principalement de faire varier la vitesse des moteurs en traduisant les signaux **de modulation de largeur d'impulsion (PWM)** issus du contrôleur de vol **APM** en alimentation électrique triphasée. Enfin, les **ESC** sont eux-même connectés à la chaîne d'alimentation via une **carte de distribution de puissance (PDB)**. Notre choix a été de disposer l'ensemble de la chaîne de propulsion sur le châssis du quadricoptère selon une configuration dite *en X* pour laquelle les moteurs fixés sur deux bras opposés tournent dans le sens horaire, tandis que ceux fixés sur les deux autres bras opposés tournent dans le sens antihoraire. Cette disposition est en effet souvent préférée dans le cas où une caméra doit être utilisée à l'avant de l'**UAV**, celle-ci pouvant être facilement fixée dans cette direction sans que les bras ne gênent la prise de vue.

7.1.4 Principaux composants logiciels déployés

L'environnement logiciel du SoC Raspberry Pi. Cet environnement s'appuie d'abord ici sur un système d'exploitation Raspbian dérivé de Debian **GNU/Linux**, permettant d'utiliser le **SoC** considéré, une fois relié à un écran et des périphériques de saisie, comme un ordinateur à part entière, afin de configurer la carte, développer, compiler ou installer les logiciels requis, etc. De plus, le composant **MAVproxy** est déployé en tant que médiateur entre le contrôleur de vol **APM** et les couches applicatives du nœud de contrôle. Cette

médiation repose sur le protocole MAVLink [133, 134, 135], qui permet de faire communiquer d'une part les couches applicatives du nœud de contrôle avec le SoC Raspberry, et d'autre part ce dernier avec le contrôleur de vol APM. Les stratégies de mobilité contrôlée sont elles développées en partie en tant que greffons du composant MAVproxy, ce qui leur permet en particulier d'une part de récupérer les données du contrôleur de vol qui seront nécessaires à l'estimation des forces virtuelles appliquées sur l'aéronef considéré, et d'autre part d'envoyer les valeurs de consignes telles que définies dans la Sous-section 3.1.4 pour alimenter la boucle PID du contrôleur de vol. Par ailleurs, la *librairie libre de vision par ordinateur (OpenCV)* [81, 136], qui est une bibliothèque graphique libre sous licence de la *collection de logiciels de Berkeley (BSD)* offrant de nombreuses fonctions de vision par ordinateur en temps réel, est également intégré dans l'environnement logiciel du SoC Raspberry, lorsque le déploiement est réalisé pour un nœud de poursuite.

L'environnement logiciel du nœud de contrôle. Comme mentionné dans la Section 4.2, le nœud de contrôle reçoit, traite et affiche l'ensemble des données de traces et de télémétrie en provenance des autres nœuds. De plus, on précise que ce nœud doit également pouvoir prendre à tout instant le contrôle d'un quelconque UAV du réseau. Ces fonctionnalités sont regroupées dans une application de type *station de contrôle au sol (GCS)*, qui permet aussi bien l'affichage en temps réel des données de télémétrie que la prise de contrôle d'un drone du réseau par une manette reliée au nœud de contrôle. Le GCS choisi, APM Planner 2.x [137], utilise le protocole MAVLink précité pour le support de ces deux types de fonctions. On notera que la prise de contrôle manuelle d'un UAV du réseau effectuée par ce moyen est dépendante du fait qu'il existe une liaison sans fil établie avec cet UAV. Si ce n'est pas le cas, la prise de contrôle peut de toute manière se faire par l'utilisation, plus habituelle, d'une télécommande radio-commandée pré-configurée à cet effet.

7.1.5 Phases de mise en œuvre, intégration et validation

Sur la base des choix matériels et logiciels précédemment présentés, la Fig. 7.3 illustre les étapes d'intégration d'un des UAV pour mettre en œuvre les nœuds du réseau. Les 2 premières illustrations Fig. 7.3 (a) et Fig. 7.3 (b) représentent la pose, sur les liens triphasés des ESC et des moteurs, d'un format de connecteurs communs, afin de pouvoir facilement monter et démonter l'un des composants, si besoin. Fig. 7.3 (c) et Fig. 7.3 (d) illustrent le montage des ESC sur le circuit d'alimentation du PDB, qui est dans cet exemple directement intégré dans le châssis de l'UAV. La Fig. 7.3 (e) donne quant à elle une représentation de la pose des moteurs, respectant la configuration de vol dite en X précédemment évoquée dans la Sous-section 7.1.3. Dans la Fig. 7.3 (f), on peut plus spécifiquement noter que la caméra utilisée avec SoC Raspberry Pi est montée à l'avant de l'UAV, le SoC lui-même étant connecté au contrôleur de vol APM par liaison série. On peut aussi apercevoir le GPS externe, qui est également connecté au contrôleur de vol. Ce GPS est fixé légèrement en hauteur sur une perche, de manière à minimiser les possibles effets de champs magnétiques et de bruits radio-fréquence produits par le reste des équipements. Ces derniers peuvent en effet avoir un effet délétère sur le fonctionnement du magnétomètre intégré dans ce modèle, et sur le GPS lui-même. La Fig. 7.3 (g) permet de souligner l'utilisation d'un récepteur de radio-commande, relié au contrôleur de vol et utilisé, comme expliqué dans le paragraphe précédent, pour disposer d'un mécanisme redondant de prise de contrôle manuel de l'UAV si nécessaire. Enfin, on peut apercevoir dans la Fig. 7.3 (h) l'UAV une fois assemblé, en situation de communication avec l'application GCS de contrôle au sol, pour laquelle une partie de la télémétrie reçue depuis le

composant logiciel MAVproxy de l'UAV est affichée sur l'écran visible dans la figure.

7.2 Résultats d'expérimentation attendus

Une fois la plate-forme cible permettant de mettre en œuvre les nœuds de poursuite, surveillance et relais intégrée et validée, il est nécessaire d'adapter une sélection de stratégies de mobilité contrôlée telles qu'étudiées dans les chapitres précédents. A la date de rédaction de ce manuscrit, la stratégie VFPe du Chapitre 5, utilisant en particulier le protocole de routage MANET OLSR, est en cours de développement. En termes de contexte d'expérimentation, les objectifs attendus par le déploiement qui conclura ce développement, sont les suivants :

- La validation de la formation des topologies attendues : une série de tests unitaires permettra de vérifier les résultats de l'ensemble des mécanismes, en particulier l'élection des nœuds et l'application des forces virtuelles, amenant la formation correcte des chaînes de communication VFP.
- La réalisation de déploiements permettant de vérifier un sous-ensemble des résultats du Chapitre 4, en ce qui concerne la valorisation optimale des paramètres-clé du protocole VFPs mentionnés dans ce chapitre. Afin de faciliter les conditions de déroulement du scénario, dans la mesure où les résultats évoqués nécessitent un nombre significatif de tests, il est intéressant de mettre en œuvre un motif de mobilité aléatoire pour le nœud de poursuite, en écartant dans ce cas l'utilisation de spécimens réels de *Vespa velutina* marqués.
- Une fois l'étape d'expérimentation précédente réalisée, il sera souhaitable de réaliser un déploiement similaire, mais en conditions proches de celles décrites par le scénario de la Section 4.2. Le motif de mobilité aléatoire mis en œuvre précédemment sur le nœud de poursuite devra en particulier être remplacé par un mécanisme d'asservissement à la position des spécimens de *V. velutina* relâchés.
- Enfin, la même mise en œuvre de la stratégie de mobilité contrôlée VFPe pourra également servir à vérifier, à travers une expérimentation réalisée de manière cohérente avec les conditions décrites dans le scénario de la Section 5.2, un sous-ensemble des résultats du Chapitre 5.



FIGURE 7.3 – De haut en bas, de gauche à droite : (a) et (b) pose des connecteurs des ESC et des moteurs, (c) pose des ESC, (d) pose du connecteur de batterie, (e) pose des moteurs, (f) connexion du SoC Raspberry, de sa caméra et du GPS, (g) pose du récepteur de radiocommande, (h) tests de transmission de l’UAV monté vers le logiciel de commande au sol.

Chapitre 8

Conclusions et perspectives

Sommaire

8.1 Résultats et enseignements	116
8.2 Perspectives et travaux futurs	117

8.1 Résultats et enseignements

Nous avons posé les bases du contexte d'étude de cette thèse en abordant d'une part dans le Chapitre 2 la thématique de la mobilité dans les réseaux sans fil, en la déclinant selon les domaines d'intérêt de cette étude : mobilité traditionnellement observée à la fois dans les réseaux ad hoc sans fil et les réseaux tolérants aux perturbations et aux délais, ainsi que diverses formes de mobilité contrôlée, dont celles s'appuyant sur l'utilisation de forces virtuelles. Une fois ces concepts introduits, nous avons pu, tout au long du Chapitre 3, définir notre propre proposition de système de forces virtuelles, et en détailler les diverses composantes répulsives, attractives, de frottement et d'alignement, en expliquant également comment appliquer concrètement ces forces lors de déploiement de nœuds mettant en œuvre ce type de mobilité contrôlée. La base de cette explication a en particulier été de spécifier une solution protocolaire, VFP (*Virtual Force-based Protocol*), ainsi que son message Balise, central à la réalisation de nombreuses fonctions : celles-ci permettent notamment aux nœuds du réseau de connaître les informations de leurs voisins pour estimer les forces virtuelles exercées, de disséminer dans le réseau leurs propres informations et de gérer les mécanismes de création et maintenance de chaînes de communications. Nous avons ensuite expliqué notre approche générale concernant la conception de différents types de stratégies de mobilité, chacune utilisant différentes variations du protocole VFP.

Ces stratégies ont par la suite été décrites dans les chapitres suivants, dans différents cadres applicatifs : dans le Chapitre 4, nous avons d'abord choisi le contexte d'un scénario de déploiement visant à lutter contre la progression d'une espèce invasive, le frelon asiatique. Nous avons pour cela mis en œuvre un réseau ad hoc sans fil s'appuyant sur un ensemble de véhicules mobiles aériens, sur lesquels nous avons déployé une première stratégie VFPs de mobilité contrôlée mettant en œuvre le protocole VFP, dans sa version simple. En effet, dans cette variation, la stratégie de mobilité contrôlée repose sur l'utilisation de messages Balise simples, ne véhiculant que les informations relatives au nœud émetteur. Dans ce chapitre, nous avons d'abord cherché à identifier un ensemble de paramètres-clés permettant de convenablement caractériser VFPs : il s'agit des tailles relatives des zones d'interaction dues aux forces virtuelles, de l'intensité des forces attractives et répulsives, du coefficient de frottement relatif aux forces éponymes et enfin des seuils de distances permettant de déterminer si un nœud-relais doit être inséré ou supprimé d'une chaîne. Nous avons ensuite, sur la base de l'analyse de métriques de performance liées aux taux de délivrance de paquets utilisateur et aux délais de bout-en-bout associés, pu déterminer les plages de valeurs, pour chacun de ces paramètres, aboutissant aux meilleures performances du réseau.

Par la suite, dans le Chapitre 5, nous avons introduit un scénario de déploiement de réseau temporaire de secours en situation de désastre, toujours de type ad hoc sans fil, puis nous avons présenté une analyse de la performance d'une stratégie de mobilité contrôlée VFPe utilisant le protocole VFP et utilisant cette fois-ci des messages Balise étendus, disséminant aussi bien les informations du nœud émetteur que de nœuds précédemment rencontrés. Nous avons ainsi montré comment cette stratégie se comporte lorsque le nombre de nœuds du réseau augmente : les résultats de performance obtenus ont ainsi permis de confirmer que l'usage d'une stratégie de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles permet de concevoir une solution efficace pour le déploiement rapide de réseaux temporaires, en particulier adaptés pour le contexte exigeant des communications de secours suite à catastrophe. De plus, nous avons souligné que ce type de stratégie se contente d'un nombre limité de nœuds réseau à mettre en œuvre, ce qui permet d'envisager un déploiement de véhicules, aériens ou non, dans des conditions réalistes, puisque le coût des équipements fait également partie des critères à prendre en compte

pour la sélection d'une solution adaptée. De plus, nous avons observé au fil de nos simulations le très net intérêt, en termes de délivrance de paquets, à mettre en œuvre sur les nœuds-relais une stratégie de mobilité contrôlée plutôt qu'un simple motif de mobilité aléatoire.

Pour autant, les taux obtenus de délivrance de paquets, de l'ordre de 35% au mieux dans les conditions de nos hypothèses de simulations, ne conviennent pas à tous les usages applicatifs. Afin de chercher à augmenter significativement ce taux, nous nous sommes intéressés, dans le Chapitre 6, à l'usage conjoint d'une stratégie de mobilité contrôlée à base de forces virtuelles et de mécanismes de tolérance aux perturbations et délais. Nous avons plongé cette stratégie dans le contexte des réseaux difficiles et des mécanismes tolérants aux perturbations. Sur la base du même scénario réseau qu'au chapitre précédent, nous avons pu constater, à travers nos résultats de simulation, que ce troisième type de stratégie bénéficie d'abord de la mise en place de sa pile de routage tolérante aux délais, pour très significativement améliorer le taux de délivrance des paquets utilisateur. Mais contrairement aux autres stratégies mettant en œuvre uniquement un routage tolérant aux délais, celle-ci permet également de limiter l'augmentation du délai de bout-en-bout moyen relatif à ces paquets, en disposant de la possibilité de basculer sur un routage ad hoc lorsqu'une route entre les nœuds de trafic est identifiée, le long d'une chaîne de communication. Plus encore, une analyse de la répartition des délais de bout-en-bout a montré que la moitié du trafic utilisateur était reçu, dans nos conditions de simulation, dans de délais courts inférieurs à 10 ms, grâce à l'établissement de chaînes de communication VFP, tandis que le reste du trafic était reçu avec des délais longs, supérieurs à 1 s, via des échanges opportunistes s'appuyant sur la pile de routage tolérante aux délais. De manière secondaire, nous avons pu également vérifier que les délais observés lors de l'utilisation d'une stratégie de mobilité contrôlée diminuent encore un peu plus lorsque les nœuds de surveillance sont soumis à des forces virtuelles de nature répulsive, au lieu de suivre un motif de mobilité purement aléatoire. Cette optimisation simple de la stratégie de mobilité contrôlée permet d'obtenir, en définitive, un léger mais tangible gain de performance supplémentaire, sans inconvénient identifié.

Finalement, nous avons conclu notre étude en détaillant dans le Chapitre 7 le contexte des plate-formes aériennes, en nous intéressant aux besoins spécifiques issus des scénarios réseau des chapitres précédents et en détaillant sous cet angle notre approche de sélection d'une plate-forme répondant à l'ensemble de ces besoins, qu'ils soient matériels ou logiciels. Nous y avons abordé la problématique d'assemblage, d'intégration et de validation d'un nœud mobile aérien adapté à l'ensemble des besoins exprimés dans les scénarios réseau présentés dans les chapitres précédents.

8.2 Perspectives et travaux futurs

Les résultats de simulation présentés tout au long de ce manuscrit de thèse soulignent l'intérêt de l'utilisation d'une stratégie de mobilité contrôlée pour un placement opportun des nœuds du réseau, dès lors que les conditions de déploiement et le contexte applicatif s'y prêtent. En effet, un certain nombre de travaux, matérialisés par les résultats obtenus dans cette étude, pourraient permettre d'explorer d'autres horizons d'utilisation pour l'emploi de ces forces virtuelles. Nous esquissons dans la suite de cette section une sélection de pistes de recherches futures.

Chaînes multiples et topologies avancées. Bien que les topologies à chaînes de communication simples étudiées dans cette thèse apportent un bénéfice significatif à l'ensemble des scénarios de simulation considérés, il est cependant possible d'imaginer que celles-

ci pourraient montrer dans certaines situations des points de faiblesse liés au choix de conception du protocole VFP, qui limite *de facto* le degré (c'est-à-dire le nombre de voisins) des nœuds intermédiaires. Avec, en termes de diversité de liens, que guère plus que les liaisons stables de communication vers leur prédécesseur et leur successeur, ainsi que les quelques liaisons opportunistes et éphémères avec d'autres nœuds se déplaçant à proximité, les nœuds intermédiaires d'une chaîne ont en effet peu ou pas de choix pour réparer une route à saut multiple et ces problèmes locaux peuvent devenir une source de dysfonctionnement pour la chaîne entière. Les mécanismes de réparation de chaîne de VFP ainsi que le bon paramétrage des seuils de distance discutés dans le Chapitre 4 devraient certes être à même de corriger le problème, comme observé dans l'ensemble des résultats de simulation des scénarios réseau présentés. En revanche, puisque la solution à ce problème risque d'être, dans certains cas, l'attente de l'insertion d'un nouveau nœud passant à proximité, les délais associés à ces mécanismes de réparation peuvent tout de même représenter une source de diminution de la performance du réseau. L'étude d'une solution protocolaire à base de forces virtuelles permettant la création d'une topologie où il existe une plus grande diversité de liens pour les nœuds du réseau (par exemple, en considérant la formation concurrente de n chaînes, $n \geq 2$, d'une source vers une destination) pourrait significativement améliorer la performance observée dans ces situations. De plus, la création de plusieurs chaînes concurrentes pourrait justifier l'intérêt de déployer différents types de mécanismes, qui dans d'autres contextes ont montré leur intérêt.

Il peut s'agir de l'opportunité d'introduire, du fait de l'existence de chaînes concurrentes, un protocole de routage à chemins multiples, afin d'améliorer la robustesse des communications en disposant de chemins de secours, si une chaîne venait à se briser. En outre, certaines solutions de routage à chemin multiples sont capable de recevoir et d'exploiter les éventuelles notifications de cassure de lien en provenance des couches de liaison, afin de mettre en œuvre des mécanismes de réparation rapide, permettant, lorsqu'au moins un autre chemin valide est disponible, de basculer rapidement sur ce dernier le trafic qui autrement serait perdu [138]. De plus, la performance des protocoles de routage à chemins multiples peut dépendre de leur faculté à découvrir et construire des chemins disjoints en termes de liens ou de nœuds, afin d'éviter que l'utilisation de ressources communes ne se traduise par un effet d'interdépendance néfaste et ne diminue les capacités ou les délais de bout-en-bout des chemins considérés [139]. Ce dernier problème, généralement étudié dans le cadre de la mobilité généralement subie des nœuds du réseau, pourrait être reconsidéré sous l'angle de la mobilité contrôlée. Ceci permettrait non seulement d'aboutir à la formation d'un nombre prédéterminé de chemins entre deux quelconques paires (source, destination) du réseau, mais aussi de s'assurer, de par le bon placement des nœuds-relais, d'un niveau prédéfini d'indépendance, en termes de liens ou de nœuds disjoints, entre les différentes chaînes ainsi construites. En conséquence, pour les raisons esquissées, une stratégie de mobilité à base de forces virtuelles capable de déclencher la formation d'une telle topologie pourrait bénéficier de l'utilisation conjointe d'un mécanisme de routage à chemins multiples.

D'autres mécanismes comme ceux issus de la théorie du codage réseau (*network coding*) pourraient également être considérés à partir du moment où l'on peut envisager de pouvoir positionner précisément les nœuds-relais au sein d'une formation adaptée. Cette approche vise à revoir le fonctionnement traditionnel de l'acheminement des données dans un réseau, notamment afin de maximiser l'utilisation qui est faite de la bande passante. Pour ce faire, les nœuds intermédiaires ont la possibilité d'effectuer des opérations (par exemple, des combinaisons linéaires avec les techniques dites de codage linéaire) sur les paquets reçus avant de les transférer. De plus, un certain nombre de travaux se sont récemment intéressés à la relation entre codage réseau et mobilité des nœuds.

Par exemple, l'étude [140] s'est intéressée aux temps de convergence d'algorithmes épidémiques et a montré l'impact bénéfique de l'utilisation conjointe de techniques de codage réseau et d'un contrôle sur la mobilité des nœuds (dans cette étude, contrôle se réfère tout au plus à la possibilité de changer leur vitesse) afin de réduire significativement ces temps. Une réflexion sur l'utilisation de mécanismes de codage réseau dans une extension des cadres algorithmiques et protocolaires que nous avons présentés tout au long de ce manuscrit de thèse pourrait ainsi représenter une piste de travail intéressante à évaluer plus en détail.

Chaînes non connectées. Les approches évoquées au paragraphe précédent, relatives à la possibilité d'enrichir les routes de communication établies entre une quelconque paire de nœuds du réseau, sous-tendent l'hypothèse que le nombre de nœuds, en particulier de nœuds de surveillance (au sens de nos scénarios réseau des chapitres précédents) est suffisant pour former ces topologies. En tout état de cause, ce nombre sera plus important que lorsqu'une simple chaîne est à former, comme cela a été supposé tout le long de ce manuscrit de thèse. A l'opposé, il est légitime de s'interroger sur la possibilité de mettre en œuvre des mécanismes de mobilité contrôlée avec un nombre de nœuds a priori insuffisant pour former des chaînes de communication, comme dans un cas simplifié dans lequel le nombre de nœuds disponibles multiplié par la portée de communication sans fil d'un nœud reste inférieur à la distance moyenne constatée entre deux quelconques paires de nœuds (source, destination) du réseau. Dans ces cas, les chaînes de communication sont peu susceptibles d'être établies, et comme nous avons pu le voir dans l'analyse de la Fig. 6.3 par exemple, fixer un nombre initial de surveillance en dessous d'un seuil donné, ici $N \leq 7$, donne des résultats de performance inférieurs à ceux obtenus par les stratégies à mobilité aléatoire. Nous avons à ce sujet souligné que dans ce cas, les formations de chaînes incomplètes réquisitionnent inutilement des nœuds intermédiaires, qui pourraient plutôt parcourir la zone d'exploration en tant que nœuds de surveillance.

Cependant, dans ces cas a priori défavorables de trop faible nombre de nœuds, il serait intéressant de revoir la manière dont les nœuds-relais gèrent la proximité géographique avec leurs prédécesseurs et leurs successeurs, lorsqu'on suppose que ces derniers ne sont pas nécessairement à portée de communication radio, et peuvent être éloignés au-delà de cette limite que nous avons imposée dans le cadre des travaux de cette thèse. Le concept auquel nous faisons ici allusion est celui des mules de données (*data mule*) [141], encore appelé message ferrying [142], selon lequel le taux de délivrance des paquets dans un réseau très peu dense peut être grandement amélioré par l'utilisation de nœuds spécifiques transportant les paquets de données vers les autres nœuds du réseau. De plus, les déplacements des mules de données peuvent, pour certaines solutions proposées, ne pas être aléatoires mais reposer sur une planification préalable permettant d'anticiper des contacts avec d'autres nœuds du réseau [143]. Dans le cadre de notre étude, où tous les nœuds formant les chaînes de communication mettent en œuvre des mécanismes de mobilité contrôlée et jouent en conséquence le rôle de mules de données, la problématique de *ferrying* apparaît ainsi grandement simplifiée. En revanche, les principes de planification coopérative et distribuée des temps et des lieux de contacts futurs avec d'autres nœuds spécifiques du réseau restent à concevoir, et leur performance reste à évaluer. Déployés dans le cadre de nos scénarios applicatifs, il serait intéressant d'évaluer comment évolue la performance du réseau, en particulier en considérant le cas d'un faible nombre initial de nœuds de surveillance comme vu par exemple dans les résultats illustrés par la Fig. 6.3 lorsque $N \leq 7$.

Bibliographie

- [1] International Telecommunication Union, “ICT Facts and Figures 2015,” p. 6, 2015.
Cité page 3
- [2] J. D. Deaton, “High Altitude Platforms for Disaster Recovery : Capabilities, Strategies, and Techniques for Emergency Telecommunications,” *EURASIP Journal on wireless communications and networking*, 2008.
2 citations pages 3 et 73
- [3] Select Bipartisan Committee to and And Investigate the Preparation for Response to Hurricane Katrina, “A failure of initiative : final report of the Select Bipartisan Committee to Investigate the Preparation for and Response to Hurricane Katrina,” *U.S. G.P.O.*, p. 364, 2006.
Cité page 3
- [4] L. Reynaud, T. Rasheed, and S. Kandeepan, “An Integrated Aerial Telecommunications Network that Supports Emergency Traffic,” in *Proceedings of the International Workshop on Emergency Telecommunications*, (Brest), 2011.
4 citations pages 3, 73, 107, et 130
- [5] L. Reynaud, S. Allsopp, P. Charpentier, H. Cao, D. Grace, R. Hermenier, A. Hrovat, G. Hughes, C. Ioan, T. Javornik, A. Munari, M. M. Vidal, J. Strother, A. Valcarce, and S. Zaharia, “Use cases definition and scenarios description, FP7-ICT-2011-8-318632-ABSOLUTE/D2.1, FP7 ABSOLUTE Project,” rap. tech., 2014.
2 citations pages 3 et 74
- [6] D. P. Venmani, Y. Gourhant, L. Reynaud, P. Chemouil, and D. Zeghlache, “Substitution Networks based on Software Defined Networking,” in *Proceedings of the 4th EAI International Conference on Ad Hoc Networks (AdHocNets '12)*, (Paris), Springer Berlin Heidelberg, 2012.
2 citations pages 4 et 130
- [7] C. B. Nelson, B. D. Steckler, and J. A. Stamberger, “The evolution of hastily formed networks for disaster response : Technologies, case studies, and future trends,” in *Proceedings - 2011 IEEE Global Humanitarian Technology Conference, GHTC 2011*, pp. 467–475, 2011.
2 citations pages 5 et 73
- [8] J. L. Burbank, P. F. Chimento, B. K. Haberman, and W. T. Kasch, “Key challenges of military tactical networking and the elusive promise of MANET technology,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 11, pp. 39–45, 2006.
Cité page 5
- [9] L. D. Xu, W. He, and S. Li, “Internet of things in industries : A survey,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, 2014.
Cité page 5
- [10] D. Mcerlean, S. Narayanan, and L. Angeles, “Distributed detection and tracking in sensor networks,” pp. 1174–1178, 2002.
Cité page 5
- [11] P. Bellavista, G. Cardone, A. Corradi, and L. Foschini, “Convergence of MANET and WSN in IoT urban scenarios,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 3558–3567, 2013. *Cité page 5*
- [12] “Project IEEE 802.11s Task Group s, http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgs_update.htm (visité le 26/11/2016),” site web, 2011.
Cité page 5
- [13] I. F. Akyildiz and W. Xudong, “A survey on wireless mesh networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 9, pp. S23–S30, 2005.
Cité page 6
- [14] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and S. Temel, “Flying Ad-Hoc Networks (FANETs) : A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
Cité page 6
- [15] K. Fall, “A delay-tolerant network architecture for challenged internets,” *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications - SIGCOMM '03*, p. 27, 2003.
2 citations pages 6 et 86

- [16] N. Aschenbruck, E. Gerhards-Padilla, and P. Martini, "A survey on mobility models for performance analysis in tactical mobile networks," *Journal of Telecommunications and Information Technology*, vol. 2, pp. 54–61, 2008. [Cité page 11](#)
- [17] J. Xie, Y. Wan, J. H. Kim, S. Fu, and K. Namuduri, "A Survey and Analysis of Mobility Models for Airborne Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, pp. 1221–1238, jan 2014. [Cité page 11](#)
- [18] F. Bai and A. Helmy, "A Survey of Mobility Models in Wireless Adhoc Networks," *University of Southern California*, pp. 1–30, 2008. [2 citations pages 11 et 13](#)
- [19] M. Haw, "Einstein's random walk," *Physics World*, vol. 18, no. 1, pp. 19–22, 2005. [Cité page 11](#)
- [20] G. F. Riley and T. R. Henderson, "The ns-3 Network Simulator," in *Modeling and Tools for Network Simulation*, pp. 15–34, Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010. [2 citations pages 11 et 76](#)
- [21] T. Camp and J. Boleng, "A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research," *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC) : Special Issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research, trends and Applications*, vol. 2, pp. 483–502, 2002. [Cité page 12](#)
- [22] E. Royer, P. Melliar-Smith, and L. Moser, "An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks," *ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No.01CH37240)*, vol. 3, pp. 857–861, 2001. [Cité page 12](#)
- [23] Y. Wan, K. Namuduri, Y. Zhou, and S. Fu, "A smooth-turn mobility model for airborne networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 7, pp. 3359–3370, 2013. [Cité page 13](#)
- [24] B. Liang and Z. J. Haas, "Predictive distance-based mobility management for multidimensional PCS networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, no. 5, pp. 718–732, 2003. [Cité page 13](#)
- [25] D. S. Vasiliev, A. Abilov, and V. V. Khvorenkov, "Peer Selection Algorithm In Flying Ad hoc Networks," pp. 3–6, 2016. [Cité page 13](#)
- [26] J. P. Rohrer, E. K.  etinkaya, H. Narra, D. Broyles, K. Peters, and J. P. G. Sterbenz, "AeroRP performance in highly-dynamic airborne networks using 3D Gauss-Markov mobility model," *Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM*, pp. 834–841, 2011. [Cité page 13](#)
- [27] J.-d. M. M. Biomo, T. Kunz, and M. St-hilaire, "An Enhanced Gauss-Markov Mobility Model for Simulations of Unmanned Aerial Ad hoc Networks," 2014. [Cité page 13](#)
- [28] M. J. F. Alenazi, C. Sahin, and J. P. G. Sterbenz, "Design Improvement and Implementation of 3D Gauss-Markov Mobility Model," no. ITC 2012, pp. 1–10, 2012. [Cité page 13](#)
- [29] E. Kuiper and S. Nadjm-Tehrani, "Mobility models for UAV group reconnaissance applications," *Second International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2006*, 2006. [2 citations pages 13 et 20](#)
- [30] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C. C. Chiang, "A group mobility model for ad hoc wireless networks," *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems*, vol. 1, no. 1, pp. 53–60, 1999. [Cité page 14](#)
- [31] M. Bergamo, R. Hain, K. Kasera, D. Li, R. Ramanathan, and M. Steenstrup, "System design specification for mobile multimedia wireless network (MMWN) (draft)," *DARPA project DAAB07-95-C-D156*, 1996. [Cité page 14](#)
- [32] M. Sanchez and P. Manzonui, "A Java-Based Ad Hoc Networks Simulator," *Proceedings of the SCS Western Multiconference Web-based Simulation Track*, 1999. [Cité page 14](#)
- [33] J. Tian, J. Hahner, C. Becker, I. Stepanov, and K. Rothermel, "Graph-based mobility model for mobile ad hoc network simulation," *Simulation . . .*, 2002. [Cité page 15](#)
- [34] F. Bai, N. Sadagopan, and A. Helmy, "IMPORTANT : A Framework to Systematically Analyze the Impact of Mobility on Performance of Routing Protocols for Ad hoc Networks," *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE*, vol. 2, pp. 825–835 vol.2, 2003. [Cité page 15](#)

- [35] M. Y. S. Uddin, D. M. Nicol, T. F. Abdelzaher, and R. H. Kravets, "A post-disaster mobility model for Delay Tolerant Networking," in *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 2785–2796, IEEE, dec 2009. *Cité page 15*
- [36] P. Hui, J. Crowcroft, and E. Yoneki, "BUBBLE Rap : Social-based forwarding in delay-tolerant networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 11, pp. 1576–1589, 2011. *Cité page 16*
- [37] N. Eagle and A. Pentland, "Reality mining : Sensing complex social systems," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 10, no. 4, pp. 255–268, 2006. *Cité page 16*
- [38] M. Kim, D. Kotz, and S. Kim, "Extracting a Mobility Model from Real User Traces," *25th International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, vol. 00, no. c, pp. 1–13, 2006. *Cité page 16*
- [39] H. Zhu, L. Fu, G. Xue, Y. Zhu, M. Li, and L. M. Ni, "Recognizing exponential inter-contact time in VANETs," *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 2010. *Cité page 16*
- [40] O. Gnawali, M. Polyakov, P. Bose, and R. Govindan, "Data centric, position-based routing in space networks," *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, vol. 2005, 2005. *Cité page 16*
- [41] S. Jain, K. Fall, and R. Patra, "Routing in a delay tolerant network," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 34, no. 4, p. 145, 2004. *2 citations pages 16 et 17*
- [42] J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen, and B. N. Levine, "MaxProp : Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2006. 25TH IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1–11, IEEE, 2006. *2 citations pages 16 et 86*
- [43] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and Wait : An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks," in *Proceeding of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking - WDTN '05*, (New York, New York, USA), pp. 252–259, ACM Press, aug 2005. *2 citations pages 16 et 86*
- [44] E. P. Jones, L. Li, J. K. Schmidtke, and P. A. Ward, "Practical Routing in Delay-Tolerant Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, pp. 943–959, aug 2007. *Cité page 17*
- [45] C. Bettstetter and C. Wagner, "The Spatial Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model," in *Mobile Ad-Hoc Netzwerke, 1. deutscher Workshop über Mobile Ad-Hoc Netzwerke WMAN*, pp. 41–58, GI, mar 2002. *Cité page 17*
- [46] C. Bettstetter, H. Hartenstein, and X. Pérez-Costa, "Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model," *Wireless Networks*, vol. 10, pp. 555–567, sep 2004. *Cité page 17*
- [47] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, *Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network*, vol. 2. IEEE, 2005. *Cité page 18*
- [48] A. Pandya, A. Kansal, and G. Pottie, "Goodput and Delay in Networks with Controlled Mobility," in *2008 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–8, IEEE, mar 2008. *Cité page 18*
- [49] J. Rao and S. Biswas, *Controlled Node Mobility : A Mechanism for Energy Load Distribution in Sensor Networks*. IEEE, nov 2006. *Cité page 18*
- [50] Q. Li and D. Rus, "Sending messages to mobile users in disconnected ad-hoc wireless networks," *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '00*, pp. 44–55, 2000. *Cité page 18*
- [51] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*. 1990. *Cité page 18*
- [52] S. M. Lavalle, "Motion planning : Part I : The essentials," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 18, no. 1, pp. 79–89, 2011. *Cité page 18*
- [53] B. Paden, M. Cap, S. Z. Yong, D. Yershov, and E. Frazzoli, "A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, pp. 33–55, mar 2016. *Cité page 18*
- [54] O. Souissi, R. Benatitallah, D. Duvivier, A. Artiba, N. Belanger, and P. Feyzeau, "Path Planning : A 2013 Survey," *Int. Conf. on Indust. Eng. and Sys. Manag.*, vol. 2013, no. October, pp. 1–8, 2013. *Cité page 18*

- [55] C. Dixon and E. W. Frew, "Optimizing cascaded chains of unmanned aircraft acting as communication relays," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 5, pp. 883–898, 2012. *Cité page 18*
- [56] M. M. Zavlanos, M. B. Egerstedt, and G. J. Pappas, "Graph-theoretic connectivity control of mobile robot networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 9, pp. 1525–1540, 2011. *Cité page 18*
- [57] N. R. Zema, E. Natalizio, M. Poss, G. Ruggeri, and A. Molinaro, "Healing wireless sensor networks from malicious epidemic diffusion," *Proceedings - IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCOSS 2014*, pp. 171–178, 2014. *Cité page 19*
- [58] P. Grassé, "La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles ; la théorie de la stigmergie," *Insectes Sociaux*, vol. 6, no. 1, pp. 41–80, 1959. *Cité page 19*
- [59] D. Payton, M. Daily, R. Estowski, M. Howard, and C. Lee, "Pheromone Robotics," *Autonomous Robots*, vol. 11, pp. 319–324, nov 2001. *Cité page 19*
- [60] E. Pignaton de Freitas, T. Heimfarth, C. E. Pereira, A. Morado Ferreira, F. Rech Wagner, and T. Larsson, "Evaluation of coordination strategies for heterogeneous sensor networks aiming at surveillance applications," in *2009 IEEE Sensors*, pp. 591–596, IEEE, oct 2009. *2 citations pages 19 et 20*
- [61] W. M. Spears, D. F. Spears, J. C. Hamann, and R. Heil, "Distributed, Physics-Based Control of Swarms of Vehicles," *Autonomous Robots*, vol. 17, no. 2/3, pp. 137–162, 2004. *2 citations pages 20 et 21*
- [62] V. Loscri, E. Natalizio, T. Razafindralambo, and N. Mitton, "Distributed algorithm to improve coverage for mobile swarms of sensors," *Proceedings - IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCoSS 2013*, pp. 292–294, 2013. *Cité page 21*
- [63] J. Cheng, W. Cheng, and R. Nagpal, "Robust and self-repairing formation control for swarms of mobile agents," in *20th national conference on Artificial intelligence (AAAI'05)*, pp. 59–64, AAAI Press, jul 2005. *Cité page 21*
- [64] G. Elkaim and R. Kelbley, "A Lightweight Formation Control Methodology for a Swarm of Non-Holonomic Vehicles," in *2006 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–8, IEEE, 2006. *Cité page 21*
- [65] Y. Hanada, G. Lee, and N. Y. Chong, "Adaptive Flocking of a Swarm of Robots Based on Local Interactions," in *2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pp. 340–347, IEEE, apr 2007. *Cité page 21*
- [66] E. Yanmaz, "Connectivity versus Area Coverage in Unmanned Aerial Vehicle Networks," in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 719–723, IEEE, jun 2012. *3 citations pages 21, 22, et 23*
- [67] D. V. Le, H. Oh, and S. Yoon, "VirFID : A Virtual Force (VF)-based Interest-Driven moving phenomenon monitoring scheme using multiple mobile sensor nodes," *Ad Hoc Networks*, vol. 27, pp. 112–132, apr 2015. *Cité page 21*
- [68] I. Khoufi, P. Minet, and A. Laouiti, "OA-DVFA : A Distributed Virtual Forces-based Algorithm to monitor an area with unknown obstacles," in *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 1036–1041, IEEE, jan 2016. *Cité page 22*
- [69] "Carte de répartition de *Vespa velutina* en France," site web, Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN), https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/433589 (visité le 01/09/2016). *Cité page 45*
- [70] T. Mollet and C. de la Torre, "Vespa velutina - The Asian hornet," *Bee Craft*, pp. 11–14, 2007. *Cité page 45*
- [71] J. Haxaire and C. Villemant, "Impact sur l'entomofaune des pièges à frelon asiatique," *Insectes*, vol. 159, 2010. *Cité page 46*
- [72] E. Darrouzet, J. Gévar, and S. Dupont, "A scientific note about a parasitoid that can parasitize the yellow-legged hornet, *Vespa velutina nigrithorax*, in Europe," *Insectes*, vol. 159, 2010. *Cité page 46*

- [73] J. Blot, "Localisation et destruction des nids de frelons asiatiques, conception du réseau de signalement," *Bulletin technique apicole*, vol. 34, no. 4, pp. 205–210, 2008. *Cité page 46*
- [74] M. Smith, "Marking bees and queens," *Bee World*, vol. 53, no. 1, pp. 9–13, 1972. *Cité page 47*
- [75] I. M. M. Heidinger, M. D. Meixner, S. Berg, and R. Büchler, "Observation of the mating behavior of honey bee (*Apis mellifera* L.) queens using radio-frequency identification (RFID) : Factors influencing the duration and frequency of nuptial flights," *Insects*, vol. 5, no. 3, pp. 513–527, 2014. *Cité page 47*
- [76] C. W. Schneider, J. Tautz, B. Grünewald, and S. Fuchs, "RFID tracking of sublethal effects of two neonicotinoid insecticides on the foraging behavior of *Apis mellifera*," *PLoS ONE*, vol. 7, no. 1, p. e30023, 2012. *2 citations pages 47 et 48*
- [77] M. Molet, L. Chittka, R. J. Stelzer, S. Streit, and N. E. Raine, "status modulates worker responses Colony nutritional to foraging in the bumblebee recruitment pheromone *Bombus terrestris*," *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 62, no. 12, pp. 1919–1926, 2014. *Cité page 47*
- [78] A. Vega, C.-c. Lin, K. Swaminathan, A. Buyuktosunoglu, S. Pankanti, and P. Bose, "Resilient , UAV-Embedded Real-Time Computing," in *IEEE International Conference on Computer Design (ICCD)*, 2015. *Cité page 48*
- [79] C. Cambra, S. Sendra, J. Lloret, and L. Parra, "Ad hoc Network for Emergency Rescue System based on Unmanned Aerial Vehicles," *Network Protocols and Algorithms*, vol. 7, no. 4, p. 72, 2015. *3 citations pages 48, 107, et 109*
- [80] M. Laiacker, M. Schwarzbach, and K. Kondak, "Automatic aerial retrieval of a mobile robot using optical target tracking and localization," *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, vol. 2015-June, 2015. *2 citations pages 48 et 108*
- [81] H. Yadav, S. Srivastava, P. Mukherjee, and B. Lall, "A real-time ball trajectory follower using Robot Operating System," *2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, pp. 511–515, 2015. *3 citations pages 48, 108, et 112*
- [82] M. Stoffers and G. Riley, "Comparing the ns-3 propagation models," *Proceedings of the 2012 IEEE 20th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, MASCOTS 2012*, pp. 61–67, 2012. *Cité page 52*
- [83] K. Xu, M. Gerla, and S. Bae, "Effectiveness of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11 based ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 107–123, 2003. *2 citations pages 58 et 59*
- [84] A. Banchs, A. Azcorra, C. Garcia, and R. Cuevas, "Applications and challenges of the 802.11e EDCA mechanism : an experimental study," *IEEE Network*, vol. 19, pp. 52–58, jul 2005. *2 citations pages 60 et 64*
- [85] H.-H. Shin, S. Lee, and B.-S. Kim, "Performance Improvement Using Self-Link-Breakage Announcement in Wireless Ad-hoc Networks," in *2013 IEEE 16th International Conference on Computational Science and Engineering*, pp. 208–212, IEEE, dec 2013. *Cité page 64*
- [86] Bing Zhang and M. Shirazi, "Implementation of explicit wireless loss notification using MAC-layer information," in *2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003.*, vol. 2, pp. 1339–1343, IEEE. *Cité page 64*
- [87] S.-J. Kim and I.-H. Whang, "Acceleration Constraints for Maneuvering Formation Flight Trajectories," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 2, pp. 1052–1060, 2012. *Cité page 65*
- [88] "Radiocommunication Objectives and Requirements for Public Protection and Disaster Relief," rap. tech., ITU, 2015. *2 citations pages 73 et 77*
- [89] "CEPT ECC Report 199 : Public Protection and Disaster Relief spectrum requirements," rap. tech., CEPT, 2013. *Cité page 73*
- [90] L. Reynaud and T. Rasheed, "Deployable Aerial Communication Networks : challenges for futuristic applications," in *ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN)*, pp. 9–16, 2012. *3 citations pages 73, 107, et 130*

- [91] “The Role of Deployable Aerial Communications Architecture in Emergency Communications and Recommended Next Steps,” rap. tech., Federal Communications Commission (FCC), Washington, 2011. *Cité page 73*
- [92] A. Qiantori, A. B. Sutiono, H. Hariyanto, H. Suwa, and T. Ohta, “An Emergency Medical Communications System by Low Altitude Platform at the Early Stages of a Natural Disaster in Indonesia,” *Journal of medical systems*, pp. 1–12–12, mar 2010. *2 citations pages 73 et 107*
- [93] K. Gomez, S. Kandeepan, M. M. Vidal, V. Boussemart, R. Ramos, R. Hermenier, T. Rasheed, L. Goratti, L. Reynaud, D. Grace, Q. Zhao, Y. Han, S. Rehan, N. Morozs, T. Jiang, I. Bucaille, T. Wirth, R. Campo, and T. Javornik, “Aerial base stations with opportunistic links for next generation emergency communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 31–39, apr 2016. *3 citations pages 73, 107, et 129*
- [94] J. Hunter, “Telecommunications delivery in the Sydney 2000 Olympic Games,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 7, pp. 86–92, 2001. *Cité page 74*
- [95] A. Valcarce, T. Rasheed, K. Gomez, K. Sithamparanathan, L. Reynaud, R. Hermenier, A. Munari, M. Mohorcic, M. Smolnikar, and I. Bucaille, “Airborne Base Stations for Emergency and Temporary Events,” in *5th International Conference on Personal Satellite Services PSATS13*, (Toulouse), pp. 1–12, 2013. *2 citations pages 74 et 130*
- [96] G. Varela, P. Caamamo, F. Orjales, A. Deibe, F. Lopez-Pena, and R. J. Duro, “Swarm intelligence based approach for real time UAV team coordination in search operations,” in *2011 Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, pp. 365–370, IEEE, oct 2011. *Cité page 74*
- [97] K. Daniel, S. Rohde, N. Goddemeier, and C. Wietfeld, “A communication aware steering strategy avoiding self-separation of flying robot swarms,” in *2010 IEEE International Conference on Intelligent Systems, IS 2010 - Proceedings*, pp. 254–259, 2010. *Cité page 74*
- [98] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR),” rap. tech., IETF, 2003. *3 citations pages 76, 77, et 91*
- [99] R. Council and N. Sorovacu, “National Transportable Telecommunications Capability : commercial satellite and cellular communications for emergency preparedness,” in *MIL-COM 92 Conference Record*, pp. 137–140, IEEE, 1992. *Cité page 86*
- [100] J.-s. Huang, Y.-t. Wu, and Y.-n. Lien, “Bandwidth Allocation of Contingency Cellular Network,” in *16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’13)*, 2013. *Cité page 86*
- [101] L. Sassatelli, A. Ali, M. Panda, T. Chahed, and E. Altman, “Reliable Transport in Delay-Tolerant Networks With Opportunistic Routing,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, pp. 5546–5557, oct 2014. *Cité page 86*
- [102] Y. Li, P. Hui, D. Jin, and S. Chen, “Delay-tolerant network protocol testing and evaluation,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, pp. 258–266, jan 2015. *Cité page 86*
- [103] I. Psaras, G. Papastergiou, V. Tsaoussidis, and N. Peccia, “DS-TP : Deep-space transport protocol,” *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2008. *Cité page 86*
- [104] Ö. B. Akan, J. Fang, and I. F. Akyildiz, “TP-Planet : A Reliable Transport Protocol for Interplanetary Internet,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 2, pp. 348–361, 2004. *Cité page 86*
- [105] A. Balasubramanian, B. Levine, and A. Venkataramani, “DTN routing as a resource allocation problem,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 37, no. 4, p. 373, 2007. *2 citations pages 86 et 87*
- [106] H. Chao, Y. Cao, and Y. Chen, “Autopilots for small fixed-wing unmanned air vehicles : A survey,” *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007*, pp. 3144–3149, 2007. *Cité page 88*
- [107] F. Kendoul, Y. Zhenyu, and K. Nonami, “Embedded autopilot for accurate waypoint navigation and trajectory tracking : Application to miniature rotorcraft UAVs,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2884–2890, 2009. *Cité page 88*

- [108] M. J. F. Alenazi, Y. Cheng, D. Zhang, and J. P. G. Sterbenz, "Epidemic routing protocol implementation in ns-3," in *Proceedings of the 2015 Workshop on ns-3 - WNS3 '15*, (New York, New York, USA), pp. 83–90, ACM Press, may 2015. *2 citations pages 89 et 91*
- [109] M. Ito, H. Nishiyama, and N. Kato, "A novel routing method for improving message delivery delay in hybrid DTN-MANET networks," *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 72–77, 2013. *2 citations pages 100 et 101*
- [110] S. Jain, S. Gopinath, and D. Raychaudhuri, "STAR : Storage aware routing protocol for generalized delay tolerant networks," *2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2011 - Digital Proceedings*, 2011. *Cité page 100*
- [111] C. Raffelsberger and H. Hellwagner, "A hybrid MANET-DTN routing scheme for emergency response scenarios," *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2013*, pp. 505–510, 2013. *2 citations pages 100 et 101*
- [112] S. R. Azzuhri, H. Ahmad, M. Portmann, I. Ahmedy, and R. Pathak, "An Efficient Hybrid MANET-DTN Routing Scheme for OLSR," *Wireless Personal Communications*, vol. 89, no. 4, pp. 1335–1354, 2016. *Cité page 100*
- [113] E. Gerhards-Padilla, "Modelling mobility in disaster area scenarios," *MSWiM '07 : Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, 2007. *Cité page 101*
- [114] S. Cabrero, X. G. Paneda, R. Garcia, D. Melendi, and T. Plagemann, "Dynamic Temporal Scalability : Video adaptation in sparse Mobile Ad-Hoc Networks," *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pp. 349–356, 2012. *Cité page 101*
- [115] S. Chandrasekharan, K. Gomez, A. Al-Hourani, S. Kandeepan, T. Rasheed, L. Goratti, L. Reynaud, D. Grace, I. Bucaille, T. Wirth, and S. Allsopp, "Designing and implementing future aerial communication networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 26–34, 2016. *3 citations pages 105, 107, et 129*
- [116] D. Grace and M. Mohorcic, *Broadband Communications via High Altitude Platforms*. 2010. *Cité page 106*
- [117] D. Grace, J. Thornton, T. Konefal, C. Spillard, and T. C. Tozer, "Broadband Communications from High Altitude Platforms – The HeliNet Solution," *Traffic*, no. January, 2000. *Cité page 106*
- [118] M. Mohorcic, D. Grace, G. Kandus, and T. Tozer, "Broadband Communications from Aerial Platform Networks," in *IST Mobile and Wireless Communications Summit*, (Lyon), 2004. *Cité page 106*
- [119] "ERAST - Environmental Research Aircraft and Sensor Technology," site web, Fact Sheet sur le site Web de la NASA, <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-020-DFRC.html> (visité le 24/11/2016). *Cité page 106*
- [120] R. Miura, H. Tsuji, M. Maruyama, M. Oodo, M. Suzuki, and Y. Nishi, "Experiment of telecom/broadcasting mission using a high-altitude solar-powered aerial vehicle Pathfinder-Plus," *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*, vol. 2, pp. 469–473, 2002. *Cité page 106*
- [121] M. Boyer, "Global Observer, AeroVironment's Extreme Endurance Unmanned Aircraft System, Achieves Historique First Hydrogen-Powered Flight," site web, 2011. *Cité page 106*
- [122] D. Grace, T. Yang, S. Allsopp, L. Reynaud, and M. Mohorcic, "Aerial Platforms Study, FP7-ICT-2011-8-318632-ABSOLUTE/D2.3," rap. tech., 2013. *2 citations pages 106 et 107*
- [123] Jamie Condliffe, "Facebook's Plans to Bring Flying Internet to Everyone Aren't Going So Well, MIT Technology Review," rap. tech., 2016. *Cité page 107*
- [124] J. M. Sullivan, "Evolution or revolution ? The rise of UAVs," *IEEE Technology and Society Magazine*, vol. 25, no. 3, pp. 43–49, 2006. *Cité page 107*

- [125] W. Changxia, C. Xianbin, L. Renjun, and W. Fei, "Registration-based moving vehicle detection for low-altitude urban traffic surveillance," *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on*, pp. 373–378, 2010. *Cité page 107*
- [126] J. A. Berni, P. J. Zarco-Tejada, L. Suárez, and E. Fereres, "Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 3, pp. 722–738, 2009. *Cité page 107*
- [127] C. Jarrett, K. Perry, and K. A. Stol, "Controller comparisons for autonomous railway following with a fixed-wing UAV," *ICARA 2015 - Proceedings of the 2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, pp. 104–109, 2015. *Cité page 107*
- [128] F. Takemura, K. Maeda, and S. Tadokoro, "Attitude stability of a cable driven balloon robot," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3504–3509, 2006. *Cité page 107*
- [129] N. Komerath, "An imaging, communications and beamed power architecture for first responders," *ACWR 2011 - Proceedings of the International Conference on Wireless Technologies for Humanitarian Relief*, pp. 421–428, 2011. *Cité page 107*
- [130] S. Gupte, P. I. T. Mohandas, and J. M. Conrad, "A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles," *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*, 2012. *Cité page 107*
- [131] L. Reynaud, "ANR RESCUE : Scenario description, functional requirements, and experiment sizing," rap. tech., 2012. *Cité page 108*
- [132] Y. Song, Y. Wang, J. Wang, Z. Li, G. Li, and F. Yu, "An intelligent visual line tracking system via quadrotor platform," in *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 6339–6344, IEEE, may 2016. *2 citations pages 108 et 109*
- [133] "Communicating with Raspberry Pi via MAVLink," site web, Documentation sur le site Web ardupilot.org, <http://ardupilot.org/dev/docs/raspberry-pi-via-mavlink.html> (visité le 26/11/2016). *2 citations pages 109 et 112*
- [134] G. Crespo, G. Glez-de Rivera, J. Garrido, and R. Ponticelli, "Setup of a communication and control systems of a quadrotor type Unmanned Aerial Vehicle," *Design of Circuits and Integrated Systems*, pp. 1–6, 2014. *2 citations pages 109 et 112*
- [135] "MAVLink (Micro Air Vehicle Communication Protocol) Home Page, <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start> (visité le 26/11/2016)," site web. *Cité page 112*
- [136] I. Culjak, D. Abram, T. Pribanic, H. Dzapo, and M. Cifrek, "A brief introduction to OpenCV," *MIPRO, 2012 Proceedings of the 35th International Convention*, pp. 1725–1730, 2012. *Cité page 112*
- [137] "APM Planner 2.x Home Page, <http://ardupilot.org/planner2/> (visité le 26/11/2016)," site web, 2016. *Cité page 112*
- [138] I. Doghri, L. Reynaud, and I. Guérin-Lassous, "On The Recovery Performance of Single- and Multipath OLSR in Wireless Multi-Hop Networks," in *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Ad Hoc Networks (ADHOCNETS'11)*, (Paris), 2011. *2 citations pages 118 et 130*
- [139] S.-J. Lee and M. Gerla, "Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks," *ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No.01CH37240)*, vol. 10, pp. 3201–3205, 2001. *Cité page 118*
- [140] G. Wang, Z. Lin, and J. Wu, "On the Role of Mobility and Network Coding on Multi-message Gossip in Random Geometric Graphs," in *2016 IEEE 14th Intl Conf on Dependable, Autonomous and Secure Computing, 14th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 2nd Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress*, 2016. *Cité page 119*
- [141] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data MULEs : Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," *Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, SNPA 2003*, pp. 30–41, 2003. *Cité page 119*

- [142] M. M. Bin Tariq, M. Ammar, and E. Zegura, "Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes," in *Proceedings of the seventh ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing - MobiHoc '06*, (New York, New York, USA), p. 37, ACM Press, may 2006. Cité page 119
- [143] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, "A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks," *MobiHoc '04 : Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 187–198, 2004. Cité page 119

Publications réalisées

Publications réalisées en support de cette thèse

1. **L. Reynaud** and I. Guérin-Lassous, "Improving the Performance of Challenged Networks with Controlled Mobility," To appear in ACM/Springer Mobile Networks and Applications journal, 2017.
2. **L. Reynaud** and I. Guérin-Lassous, "Design of a Force-based Controlled Mobility on Aerial Vehicles for Pest Management," in Ad Hoc Networks, Vol. 53, pp. 41-52, 2016.
3. **L. Reynaud** and I. Guérin-Lassous, "Improving the Performance of Challenged Networks with Controlled Mobility," in Proc. of the 8th EAI International Conference on Ad Hoc Networks (AdHocNets 2016), Ottawa, Canada, 2016.
4. **L. Reynaud** and I. Guérin-Lassous, "Physics-Based Swarm Intelligence for Disaster Relief Communications," in Proc. of the 15th Int. Conf. on Ad Hoc Networks and Wireless (AdHocNow), Lille, France, 2016.
5. **L. Reynaud**, I. Guérin Lassous and J.O. Calvar, "Mobilité contrôlée pour la poursuite de frelons," In proc. of 17èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (ALGOTEL'15), Beaune, France, 2015.

Publications antérieures, relatives aux plate-formes aériennes

- **L. Reynaud**, K. Gomez and T. de Cola, "Quality of Service for LTE Public Safety Networks with Satellite Backhaul," in Proc. of the 27th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2016), Valencia, Spain, 2016.
- C. Sathyanarayanan, K. Gomez, A. Al-Hourani, K. Sithampanathan, T. Rasheed, L. Goratti, **L. Reynaud**, D. Grace, I. Bucaille, T. Wirth, S. Allsop, "Designing and Implementing Future Aerial Communication Networks," IEEE Com. Mag., vol. 54, issue 5, 2016. [115]
- K. Gomez, K. Sithampanathan, M. Vidal, V. Boussemart, Raquel Ramos, T. Rasheed, L. Goratti, **L. Reynaud**, David Grace, I. Bucaille, P. Charpentier, R. Campo, T. Javornik, N. Morozs, "Aerial Base Stations with Opportunistic Links for Next Generation Emergency Communications," IEEE Com. Mag., vol. 54, Issue 4, 2016. [93]
- S. Chandrasekharan, A. Hourani, K. Gomez, K. Sithampanathan, R.J. Evans, **L. Reynaud**, S. Scalise, "Performance Evaluation of LTE and WiFi Technologies in Aerial Networks," in proc. of IEEE Global Communications Conference (Globecom 2016), Washington DC, USA, 2016.
- A. Al-Hourani, S. Chandrasekharan, Abbas Jamalipour, **L. Reynaud** and K. Sithampanathan, "Optimal Cluster Head Spacing for Energy-Efficient Communication in Aerial-Backhauled Networks", in proc. of 2015 IEEE Global Com. Conf. : Satellite and Space Com. (Globecom'2015/SAC), San Diego, USA, 2015.
- S. Chandrasekharan, A. Hourani, Kagiso Magowe, **L. Reynaud** and K. Sithampanathan, "Propagation Measurements for D2D in Rural Areas," in proc. of IEEE Int. Conf. on Communications 2015 / Device-to-Device Communication for Cellular and Wireless Networks (ICC'15/D2D), 2015.

- K. Gomez, L. Goratti, T. Rasheed and **L. Reynaud**, “Enabling Disaster Resilient 4G Mobile Communication Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, Issue 12, 2014.
- S. Kandeepan, K. Gomez, **L. Reynaud**, and T. Rasheed, “Aerial-Terrestrial Communications : Terrestrial Cooperation and Energy-Efficient Transmissions to Aerial-Base Stations,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 2715–2735, 2014.
- K. Gomez, T. Rasheed, **L. Reynaud** and L. Goratti, “FME : A Flexible Management Entity for Virtualizing LTE Evolved Packet Core,” in proc. of the 2014 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS’14), Krakow, Poland, 2014.
- K. Gomez, T. Rasheed, **L. Reynaud** and K. Sithamparanathan, “On the Performance of Aerial LTE Base-Station for Public Safety and Emergency Recovery,” in proc. of the 4th Workshop on Wireless Networking and Control for Unmanned Autonomous Vehicles (GlobeCom/WiUAV’13), Atlanta, USA, 2013.
- K. Gomez, T. Rasheed, **L. Reynaud** and I. Bucaille, “Realistic Deployments of LTE-based Hybrid Aerial-Terrestrial Networks for Public Safety”, to appear in proc. of the 1st Int. IEEE Workshop on Emerging Technologies and Trends for Public Safety Communications (CAMAD/ETPSC ’13), Berlin, 2013.
- A. Valcarce, T. Rasheed, K. Gomez, K. Sithamparanathan, **L. Reynaud**, R. Hermenier, A. Munari, M. Mohorcic, M. Smolnikar, I. Bucaille, “Airborne Base Stations for Emergency and Temporary Events,” in proc. of the 5th International Conference on Personal Satellite Services (PSATS’13), Toulouse, 2013. [95]
- K. Gomez, S. Kandeepan, **L. Reynaud** and T. Rasheed, “Adaptive Energy Efficient Communications for Rapidly Deployable Aerial-Terrestrial Networks,” in proc. of the Int. Workshop on Energy Efficiency in Wireless Networks & Wireless Networks for Energy Efficiency (ICC’13 - E2Nets), 2013.
- **L. Reynaud** and T. Rasheed, “Deployable Aerial Communication Networks : Challenges for Futuristic Applications,” in proc. of the Ninth ACM Int. Symp. on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN ’12), 2012. [90]
- **L. Reynaud**, T. Rasheed, and S. Kandeepan, “An Integrated Aerial Telecommunications Network that Supports Emergency Traffic,” in proc. of the Int. Workshop on Emergency Telecommunications, 2011. [4]
- **L. Reynaud**, S. Zaïmi, and Y. Gourhant, “Competitive assessments for HAP delivery of mobile services in emerging countries,” in proc. Of the 15th Int. Conf. on Intelligence in Next Generation Networks, 2011, pp. 307–312.
- S. Kandeepan, K. Gomez, T. Rasheed, and **L. Reynaud**, “Energy Efficient Cooperative Strategies in Hybrid Aerial-Terrestrial Networks for Emergencies,” in proc. of the 22th IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2011.

Autres publications antérieures

- D. Binet, M. Boucadair, C. Jacquenet, D. Collange, K. Guillouard, Y. L’Azou, L. Muscariello, **L. Reynaud**, P. Seite, V. Gouraud, “Multipath TCP (MPTCP) : Motivations, Status, and Opportunities for the Future Internet,” Book chapter, *Handbook of Research on Redesigning the Future of Internet Architectures*, DOI : 10.4018/978-1-4666-8371-6.ch009, IGI Global, 2015.
- D.P. Venmani, Y. Gourhant, **L. Reynaud**, P. Chemouil and Djamal Zeghlache, “Substitution Networks based on Software Defined Networking,” in proc. of the 4th EAI Int. Conf. on Ad Hoc Networks (AdHocNets ’12), 2012. [6]
- I. Doghri, **L. Reynaud**, and I. Guérin-Lassous, “On The Recovery Performance of Single- and Multipath OLSR in Wireless Multi-Hop Networks,” in proc. of the 3rd Int. ICST Conf. on Ad Hoc Networks (ADHOCNETS’11), 2011. [138]

- V. Toubiana, H. Labiod, **L. Reynaud**, and Y. Gourhant, “A global security architecture for operated hybrid WLAN mesh networks,” *Computer networks*, vol. 54, no. 2, pp. 218–230, 2010.
- V. Toubiana, H. Labiod, **L. Reynaud**, and Y. Gourhant, “An analysis of ASMA performances against packet dropping attacks in dense networks,” in *proc. of the IEEE Symp. on Computers and Communications*, pp. 254–259, 2008.
- V. Toubiana, H. Labiod, **L. Reynaud**, and Y. Gourhant, “Performance comparison of multi-path reactive Ad hoc routing protocols,” in *proc. of the IEEE 19th Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1–6, 2008.
- G. Paroux, I. Demeure, and **L. Reynaud**, “A Power-aware Middleware for Mobile Ad-hoc Networks,” in *proc. of the 8th Int. Conf. on New Technologies in Distributed Systems NOTERE*, pp. 1–7, 2008.
- G. Paroux, I. Demeure, and **L. Reynaud**, “Un Intergiciel Adaptable à l’Energie,” in *proc. of 8ème Conférence Internationale sur les NOuvelles TEchnologies de la REpartition (NOTE-RE’08)*, 2008.
- V. Toubiana, H. Labiod, **L. Reynaud**, and Yvon Gourhant, “An Adaptive Security Framework for Ad Hoc Networks,” in *proc. of the 1st IFIP int. Conf. on New Technologies, Mobility and Security (NTMS’07)*, pp. 397–406, 2007.
- T. Rasheed, K. Al Agha, U. Javaid, and **L. Reynaud**, “Cluster-Quality Based Hybrid Routing for Large Scale Mobile Multi-Hop Networks,” in *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, pp. 3052–3057, 2007.
- T. Rasheed, U. Javaid, D.-E. Meddour, **L. Reynaud**, and K. Al Agha, “An Efficient Stable Clustering Algorithm for Scalable Mobile Multi-Hop Networks,” in *proc. of the 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conf.*, pp. 89–94, 2007.
- D.-E. Meddour, **L. Reynaud**, Y. Gourhant, and B. Mathieu, “Unified Support for Quality of Service Metrics Management in Mobile Ad Hoc Networks Using OLSR,” in “Challenges in Ad Hoc Networks”, K. Al Agha, G. Lassous & G. Pujolle, Eds., in *proc. of the 4th Annual Mediterranean Workshop on Ad Hoc Networks*, vol. 197, pp. 109–118–118, 2006.
- T. Rasheed, **L. Reynaud**, Y. Gourhant, and K. Al Agha, “Reliability of Weight Metric based Clustering Models in Large Scale Mobile Ad Hoc Networks,” in *(510) Wireless Networks and Emerging Technologies - 2006*, 2006.
- T. Rasheed, U. Javaid, **L. Reynaud**, and K. Al Agha, “Adaptive Weighted Clustering for Large Scale Mobile Ad Hoc Networking Systems,” in *Int. Conf. on Wireless Algorithms, Systems and Applications (WASA’06)*, 2006.
- T. Rasheed, **L. Reynaud**, and K. Al Agha, “A stable clustering scheme for large scale mobile ad hoc networks,” in *proc. of the IEEE Sarnoff Symp. on Advances in Wired and Wireless Communication*, pp. 121–124, 2005.
- **L. Reynaud**, D. Meddour, and Y. Gourhant, “An open architecture that manages quality of service within reinforced ad hoc networks,” in *proc. of the Int. Workshop on Wireless Ad-Hoc Networks*, pp. 217–222, 2004.

Annexe A

Liste des acronymes

- 2G** réseau sans fil cellulaire de seconde génération. 3
- APM** ArduPilotMega. 109, 111, 112
- BEC** régulateur de tension (*Battery Eliminator Circuit*). 111
- BSD** collection de logiciels de Berkeley (*Berkeley Software Distribution*). 112
- CBR** à débit constant (*Constant Bitrate*). iii, 52–55, 57–65, 67, 69, 77–82, 91–95, 97–99
- CDF** fonction de répartition (*Cumulative Distribution Function*). 91, 95, 96, 98
- CEPT** conférence Européenne des administrations des postes et des télécommunications. 73
- CSI** interface série pour caméra (*Camera Serial Interface*). 109
- DTN** réseau tolérant aux délais et aux perturbations (*Delay- and Disruption-Tolerant Network*). 6–8, 10, 11, 16–18, 43, 86–90, 92, 95–97, 99–101
- ECC** comité des communications électroniques (*Electronic Communications Committee*). 73
- ECR** modèle de mobilité aléatoire corrélé exponentiellement (*Exponential Correlated Random*). 14
- EDCA** méthode améliorée d'accès au médium de communication en mode distribué (*Enhanced Distributed Channel Access*). 60, 64
- ESC** contrôle électronique de vitesse (*Electronic Speed Control*). 111, 112, 114
- FANET** réseau ad hoc aérien (*Flying Ad hoc Network*). 6
- GCS** station de contrôle au sol (*Ground Control Station*). 112
- GNU** GNU N'est pas Unix (*GNU's Not Unix*, acronyme récursif). 111
- GPS** géo-positionnement par satellite (*Global Positioning System*). 109, 112, 114
- HAP** plate-forme de haute altitude (*High Altitude Platform*). 73, 105–108
- HDTV** télévision haute définition (*High Definition Television*). 106
- HR-DSSS** étalement de spectre par saut de fréquence et à haut débit (*High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum*). 76, 77, 80, 91
- IEEE** institut des ingénieurs en électricité et en électronique (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). 5, 49, 51, 59

- IMU** centrale inertielle (*Inertial Measurement Unit*). 49, 88, 109
- IP** protocole Internet (*Internet Protocol*). 62
- LAP** plate-forme de basse altitude (*Low Altitude Platform*). 106–108
- LiPo** lithium polymer. 111
- LOS** visée directe (*Line Of Sight*). 6, 73
- LTE** évolution à long terme (*Long Term Evolution*). 105, 107
- MA** modèle de mobilité de marche aléatoire (*Random Walk*). 11, 12, 16, 17
- MAC** contrôle d'accès au support (*Medium Access Control*). 59, 62, 64
- MANET** réseau ad hoc mobile (*Mobile Ad Hoc Network*). 5–7, 10, 11, 16, 18, 22, 43, 49, 50, 52, 64, 68, 73, 78, 81, 86–92, 97, 99, 100, 113
- MAV** micro-véhicule aérien (*Micro Aerial Vehicle*). 107–109
- MUAV** micro-véhicule aérien sans équipage (*Micro Unmanned Aerial Vehicle*). 107
- OLSR** protocole de routage à états de liens optimisé (*Optimized Link-State Protocol*). 52, 76–78, 81, 89–91, 97, 99, 100, 113
- OpenCV** librairie libre de vision par ordinateur (*Open Source Computer Vision Library*). 112
- PCAP** capture de paquets (*Packet Capture*). 59, 61
- PDB** carte de distribution de puissance (*Power Distribution Board*). 111, 112
- PDR** taux de délivrance des paquets (*Packet Delivery Ratio*). 52, 53, 55, 57–60, 62, 64–71, 77–84, 86, 87, 90–92, 94, 95, 97, 99
- PID** contrôleur à action proportionnelle, intégrale et dérivée (*Proportional-Integral-Derivative*). 33, 112
- PPDR** équipes de protection du public et de secours en cas de catastrophe (*Public Protection and Disaster Relief*). 73
- PWM** modulation de largeur d'impulsion (*Pulse Width Modulation*). 111
- RD** modèle de mobilité à directions aléatoires (*Random Direction*). 11, 12, 16, 17
- RFID** radio-identification (*Radio Frequency IDentification*). 47, 48
- RPGM** modèle de mobilité d'un groupe avec point de référence (*Reference Point Group Mobility Model*). 14
- RSS** sélecteur de pile de routage (*Routing Stack Selector*). 89, 91, 101
- RTS/CTS** demande d'envoi / clair pour envoyer (*Request To Send / Clear To Send*). 58, 59
- RWP** modèle de mobilité à points de repère aléatoires (*Random WayPoint*). 11–13, 16, 17, 22, 23, 52, 76, 78, 81, 89, 95, 97, 102
- SNR** rapport signal-sur-bruit (*Signal-to-Noise ratio*). 18
- SoC** système sur puce (*System-on-Chip*). 48, 109, 111, 112, 114
- ST** modèle de mobilité à changements progressifs de direction (*Smooth Turn*). 13
- UAV** véhicule aérien sans équipage (*Unmanned Aerial Vehicle*). 18–20, 22, 33, 45, 47–50, 52–54, 65, 66, 70, 71, 74, 80, 104, 105, 107, 108, 111–114
- UWN** réseau sans fil sous-marin (*Underwater Wireless Network*). 6

VANET réseau ad hoc véhiculaire (*Vehicular Ad Hoc Network*). 6

WLAN interface de communication locale sans fil (*Wireless Local Area Network*). 49

WMN réseau maillé sans fil (*Wireless Mesh Network*). 5, 6

WSN réseau de capteurs sans fil (*Wireless Sensor Network*). 5, 18, 22