



HAL
open science

Schémas de vol adaptatifs pour l'exploration de nuages par une flotte de drones : principe, mise en œuvre et expérimentations

Titouan Verdu

► **To cite this version:**

Titouan Verdu. Schémas de vol adaptatifs pour l'exploration de nuages par une flotte de drones : principe, mise en œuvre et expérimentations. Automatique / Robotique. INSA de Toulouse, 2020. Français. NNT : 2020ISAT0010 . tel-03172221

HAL Id: tel-03172221

<https://theses.hal.science/tel-03172221>

Submitted on 17 Mar 2021

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.

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de
Toulouse

Présentée et soutenue par
Titouan VERDU

Le 9 décembre 2020

**Schémas de vol adaptatifs pour l'exploration de nuages par une
flotte de drones : principe, mise en œuvre et expérimentations**

Ecole doctorale : **SYSTEMES**

Spécialité : **Robotique et Systèmes embarqués**

Unité de recherche :
Laboratoire de Recherche ENAC

Thèse dirigée par
Simon LACROIX et Gautier HATTENBERGER

Jury

M. Guido de Croon, Rapporteur
M. Franck Ruffier, Rapporteur
M. Olivier Simonin, Président du jury
Mme Yoko Watanabe, Examinatrice
M. Simon Lacroix, Directeur de thèse
M. Gautier Hattenberger, Co-directeur de thèse

Schémas de vol adaptatifs pour l'exploration de nuages par une flotte de drones : principe, mise en œuvre et expérimentations

Résumé : Les scientifiques de l'atmosphère cherchent constamment à acquérir de nouvelles données pouvant améliorer leurs modèles des phénomènes atmosphériques, et notamment des nuages. Les méthodes actuelles sont insuffisantes pour collecter des mesures adéquates de la dynamique des nuages et des paramètres microphysiques liés à leur formation générant de grandes incertitudes dans la formulation des modèles. Ce manque de données in-situ pousse les météorologues à trouver de nouvelles méthodes de collecte.

L'utilisation des drones est maintenant largement répandue et de nombreuses applications voient le jour dans différents contextes. Bien que l'utilisation d'un drone unique soit très populaire, le déploiement de flottes de drones est encore peu courant et se limite principalement à de l'exploration et de la cartographie d'environnements inconnus statiques. Une flotte pourrait trouver son utilité dans d'autres applications plus complexes comme le suivi de phénomènes dynamiques (e.g. flaques d'huile sur la mer, panaches de fumées d'une usine, phénomènes atmosphériques). Les recherches autour de la coordination d'une flotte de drones et de l'exploration d'environnements dynamiques ne sont pas encore abouties et de nombreuses contributions peuvent être apportées aux problématiques courantes dans ce domaine.

L'objectif de cette thèse est d'apporter des solutions et des stratégies afin d'explorer un environnement dynamique tel que l'évolution d'un nuage avec une flotte de drones, permettant ainsi d'assurer une meilleure couverture temporelle et spatiale qu'avec un drone unique. Ceci impose le développement d'une architecture de contrôle et de planification des drones qui assure leur coopération pour mener au mieux la mission. Les contraintes liées à ce type d'environnement et de mission limitent le travail collectif de la flotte. Pour des raisons de robustesse et d'efficacité, les mécanismes du système sont réalisés de manière distribuée où les drones embarquent les processus de planification, communiquent directement entre eux et non par l'intermédiaire d'une station unique.

Cette thèse a été réalisée en étroite collaboration avec le projet NEPHELAE qui a pour objectif de collecter des données dans des cumulus afin de reconstruire un modèle spatio-temporel 4D de son évolution. Sachant que les motifs de vols classiques utilisés dans les autopilotes ne sont pas efficaces pour explorer des environnements aussi dynamiques, la contribution principale de cette thèse est le développement et l'implémentation dans le système PAPAZZI de motifs adaptatifs de vol. Ces schémas de vol utilisent les mesures des capteurs en temps réel pour adapter les trajectoires du drone au nuage à cartographier. Cette action est réalisée à bord du drone et sans intervention d'un opérateur. Le comportement du drone change selon le motif employé, permettant le suivi de la bordure du nuage, la construction d'une carte 3D dense ou encore la détermination du cœur du nuage. La validation de ces nouvelles fonctions de navigation a été réalisée à travers

différentes simulations combinant des drones simulés dans un environnement nuageux statique puis dynamique. Par la suite, une première expérimentation hybride a été réalisée avant de déployer la flotte lors d'une campagne de mesures à la Barbade début 2020. Cette campagne a permis d'effectuer un grand nombre de vols d'exploration et de suivis de nuages dans des conditions réelles. En plus d'apporter des résultats et des pistes d'amélioration sur les schémas de vol adaptatifs, elle a permis aux scientifiques de l'atmosphère de collecter des données importantes sur les nuages qui n'avaient pas été observées jusqu'à aujourd'hui. Cette expérimentation a notamment permis de suivre une bordure de nuage avec plusieurs drones en simultané et de réaliser ainsi une première en termes de collecte de données dans un nuage.

Mots clés : Drone, robotique, architecture distribuée, mission multi-robots, exploration environnement dynamique, navigation adaptative

Remerciements

Pour commencer, j'aimerais exprimer mes plus grands remerciements à *Gautier HATTENBERGER* qui a su m'encadrer et m'épauler tout au long de ma thèse avec beaucoup de patience et de bienveillance. À mon arrivée dans le monde de la recherche, je n'étais qu'un "bébé chercheur"; j'ai beaucoup appris de ses grandes connaissances et expériences grâce à ses qualités pédagogiques. En tant que grand gourou du système PAPARAZZI, il a toujours réussi à me guider à travers cette jungle de lignes de code que constitue ce système pour me permettre d'implémenter mes idées. De plus, il a su me transmettre beaucoup de compétences sur les drones me permettant aujourd'hui d'appréhender ces systèmes avec une plus grande aisance. Sa contribution à l'avancement de mon travail est indéniable et c'est par ses conseils avisés et ses critiques constructives que j'ai pu bien comprendre les problématiques de ma thèse, trouver l'axe recherche qui me correspondait et construire des solutions appropriées. Pour toutes ces raisons j'aimerais lui dire : "**お世話になりました(Osewa ni narimashita) Hattenberger Sensei !**"

Ensuite, je remercie particulièrement *Simon LACROIX* pour son co-encadrement exemplaire. Ça a été un très grand honneur pour moi de travailler avec un chercheur rempli d'expériences et de sagesse qui connaît très bien le milieu de la robotique. Sa vision et sa connaissance du doctorat lui permettent de toujours bien comprendre les contraintes de ses doctorants que ce soit en terme de charge mentale qu'en terme de charge de travail et de trouver des solutions pour leur permettre au mieux de réussir cette épreuve (je pense notamment au célèbre WMOSSS : Weekly Meeting Of Simon'S Student qui m'ont beaucoup apporté). De plus, il a toujours été présent pour moi dans les moments difficiles, notamment lors des périodes de rédaction et de doutes, et m'a sans cesse guidé dans mes recherches tout en respectant ma vision personnelle et mes points de vue sur le sujet de la thèse.

De façon plus générale, j'aimerai vous remercier tous les deux du fond du cœur pour la confiance que vous avez placée en moi tout au long du projet et notamment lors de la campagne à la Barbade. Même dans les moments de doutes, vous avez vu en moi un potentiel et une maturité dont je n'étais moi même pas conscient. M'avoir donné des responsabilités dans ces moments difficiles m'ont permis de m'éveiller et de me rendre compte de mes capacités. Tout cela ne serait certainement pas arrivé sans vous et je m'en retrouve aujourd'hui grandi !

J'adresse mes remerciements à Messieurs *Guido DE CROON* et *Franck RUFFIER* qui ont accepté d'être les rapporteurs de ma thèse et dont les commentaires sur mon manuscrit m'ont permis d'améliorer la compréhension globale de ce rapport.

Je remercie également Monsieur Olivier SIMONIN, président du jury de thèse, ainsi que Madame Yoko WATANABE pour avoir consacré du temps pour examiner mon travail et pour les remarques pertinentes soulevées me permettant de perfectionner certains aspects de ma thèse.

J'aimerais maintenant remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné professionnellement dans l'accomplissement de ce travail. À commencer par les membres de l'équipe drone de l'ENAC qui m'ont accueilli chaleureusement et m'ont fait sentir à ma place rapidement à leurs côtés.

Merci *Jim* (alias Mister Beebop) pour cette joie et cette positivité que tu m'as apporté au quotidien malgré tous les petits problèmes que j'ai pu rencontrer pendant ces trois années. Cela a été un honneur pour moi de tremper mon groin tous les jours dans mon auge à tes côtés, de profiter de vraie bâfrerie à toutes heures, de partager avec toi des petits moments de PABO (Plan Anti Burn-Out) mais également de construire ensemble le célèbre dictionnaire du running english (frais de port = pig fees ; filet d'aiglefin = net of thin eagle ; ...). Tu restera un collègue inoubliable.

Merci *Fabien B.* pour le lien que nous avons partagé dans cette équipe ainsi que pour tout ce support technique que tu m'as m'apporté sur le système PAPARAZZI. Avoir un autre aventurier à mes côtés pour mieux explorer cette jungle de code m'a permis d'en appréhender et d'en comprendre tous les aspects bien plus rapidement.

Merci *Elquiz* pour cette légèreté et ce rayonnement de bonheur quotidien. A mes yeux, tu es l'image même de la super héroïne de la recherche : sociable, intelligente, ouverte, passionnée et complètement déjantée. Les discussions que j'ai pu avoir avec toi dans les moments difficiles ont toujours su me faire retrouver le sourire. Je ne cesserai de penser aux questions comportementales de robotique soulevées lors de nos conversations passionnées autour des séries, des robots et de l'intelligence artificielle.

Merci *Jacson* et *Yuchen* pour ce soutien pendant cette aventure que nous avons en commun qu'est la thèse. Nous avons partagé nos moments de succès comme nos moments de doute et vous avez toujours réussi à trouver les mots pour me redonner du courage pour continuer mon travail.

Merci *Aurélien* pour ces connaissances sur la thèse, sur la conception et sur les drones en général que tu m'as partagé en travaillant avec toi sur le projet NEPHE-LAE.

Merci *Michel* pour l'aide généreuse dont tu as fait preuve dans les domaines de l'électronique et de la conception que ce soit sur mes projets professionnels ou même personnels. Sache que je penserai à toi à chaque fois que je mangerai un dessert dit "matériaux de construction" ou encore une pizza "plastique" !

Merci *Xavier* pour avoir partagé avec moi cette passion du FPV et pour m'avoir encouragé à continuer de m'améliorer en pilotage de drone.

Merci *Murat* et *Jean-Philippe* pour votre accompagnement tout au long de ma thèse, en tant que jeune enseignant-chercheur vous m'avez appris beaucoup.

Merci *Alexandre* et *Fabien G.* pour les discussions diverses et variées que nous avons pu avoir sur mes problèmes d'implémentation et de développement.

Merci Ô toi grand *Yannick* Sensei, maître des mots et responsable de l'équipe drone. Ton aisance relationnelle m'a permis de me sentir tout de suite à ma place dans cette équipe et de m'enrichir pleinement de chaque personnalité qui la compose. En tant que grand néophyte de joutes oratoires ironiques, j'ai toujours été stupéfait de ton inextinguible florilège de vocabulaire de la langue française.

Le fantasque personnage que je suis restait chaque jour dans l'expectative d'une pléthore de calembour et autres boutades en tout genre. Je ne peux que te remercier pour cette vélocité oratoire et dithyrambique qui a su me mettre quotidiennement du baume au cœur. J'aimerais d'ailleurs te laisser sur ce petit calembour : "Un sale ami mérite d'être charcuté."

Je remercie également toutes les personnes avec qui j'ai fait du karaté le midi. C'était un réel plaisir de pouvoir échanger des coups de poing et de pieds (dans le plus grand respect bien sûr) avec mon superviseur et mes collègues tout en ayant mon responsable d'équipe en tant que Sensei. Ce moment défoulatoire hebdomadaire était un échappatoire important pour moi.

Pour finir, j'aimerais remercier toutes les personnes de l'ENAC que j'ai pu rencontrer que ce soit lors de conférences, de formations, d'enseignements ou tout simplement ceux avec qui j'ai eu l'occasion de discuter dans les couloirs de cette institution. Vous m'avez toujours parlé avec beaucoup de considération et vous m'avez chacun beaucoup apporté à travers les interactions que nous avons pu avoir.

Je remercie aussi tous les membres de l'équipe Robotique et InteractionS (RIS) du LAAS-CNRS qui m'ont toujours considéré comme l'un des leurs malgré le peu de temps que j'ai pu passer avec eux. Que ce soit les doctorants, les stagiaires ou les chercheurs, ils se sont toujours fortement intéressés à mon travail et ont toujours été force de proposition sur les présentations que j'ai pu leur faire. De plus, j'ai toujours pris beaucoup de plaisir à participer aux divers débats lancés pendant nos réunions concernant la place de la robotique dans notre société et faire partie de cette communauté qui réfléchit au futur des robots et les règles qui leurs sont associées est un honneur.

Pour conclure sur les remerciements professionnels, je finirai par remercier l'intégralité des membres qui ont pu participer au projet NEPHELAE. Tout d'abord, merci à *Nicolas, Pierre* et *Florian*, avec qui j'ai eu le plus d'interactions sur le projet, avec qui nous avons monté un système de drone capable d'explorer des nuages, avec qui nous avons partagé des moments de doutes difficiles et surtout avec qui j'ai partagé trois semaines de ma vie pour réaliser une campagne de vol inimaginable dans les caraïbes. La confiance et la bienveillance que l'on se portait mutuellement pendant le projet nous ont permis de construire efficacement notre système et d'obtenir des résultats des plus innovants! De plus, je nous félicite également pour avoir su surmonter notre faible expérience du terrain et mener à bien cette campagne de mesures qui n'était pas gagnée d'avance. Ensuite, un grand merci à tous les chercheurs et ingénieurs qui nous ont encadré sur ce projet : *Greg, Gautier, Simon, Murat, Grégoire, Fleur, Fabrice* et *Sophian*, votre expérience du terrain et vos connaissances sur les différents domaines nous ont permis d'appréhender les multiples problématiques de notre projet et d'en trouver les solutions pour arriver à cette fructueuse expérimentation finale. Pour finir, je remercie également tous les stagiaires, doctorants et post-doctorants qui

ont travaillé sur ce projet et qui ont participé à l'accomplissement final de ce travail.

Maintenant j'aimerais effectuer des remerciements plus personnels mais nécessaires car je ne serai certainement pas arriver si loin sans tous ces acteurs de l'ombre.

Tout d'abord un grand merci à tous mes amis, que ce soit mes meilleurs amis du lycée (*Pierre, Clément, Thibault et Werner*), ou bien mes amis d'enfance tous membre de notre crew inséparable de *Luzinay* ou encore tous mes autres amis avec qui j'ai pu parler de ma thèse. Merci pour votre support moral, pour le temps et pour l'énergie que vous avez consacré à m'écouter parler de mon projet de recherche même si cela pouvait être parfois complexe. C'est grâce à toutes nos discussions que j'ai pu me rendre compte des faiblesses de mon discours de recherche et d'ainsi apprendre à le clarifier. C'est aussi par ces discussions que j'ai pris goût à la vulgarisation scientifique et à l'enseignement !

J'adresse mes plus sincères remerciements à la plus belle rencontre de ma vie, *Marion CHALVET SORDOILLET* avec qui je partage maintenant ma vie depuis plusieurs années. Le soutien que tu m'as apporté pendant ces trois années a été remarquable et une grande partie de la réussite de cette thèse te revient sans aucun doute. Tu as su t'intéresser aux discussions sur mon projet quand il le fallait même si cela pouvait être en dehors de tes connaissances techniques et tu m'a orienté vers des pistes qui ont fait que mon travail est dans cet état aujourd'hui. Tu as toujours su trouver les mots pour me redonner la force de continuer. Je t'exprime toute ma gratitude et puisse notre avenir être comblé de bonheur !

Enfin, un énorme MERCI à toute ma famille proche et éloignée qui m'a soutenu et gratifié de leur amour me donnant ainsi la force et la motivation de continuer dans l'accomplissement de mon projet. Merci à toi *Andy VERDU*, petit frère, pour tous ces appels pendant lesquelles je me plaignais de ma vie de chercheur. À chaque fois tu me faisais ouvrir les yeux dans ces moments difficiles pour me montrer à quel point le travail que je réalisais était incroyable. Ta confiance en moi et tes encouragements ont été une des clés de mon succès, sois-en certain. J'aimerais adresser mes derniers remerciements à mes parents, *Colette et Paul VERDU* sans qui je ne serais pas là à rédiger ce manuscrit aujourd'hui. L'éducation dont vous avez fait preuve à mon égard ont construit l'homme que je suis : curieux, passionné et sociable. De plus, vous avez toujours trouver les mots et les arguments pour me permettre de me transcender et de pousser mes limites toujours plus loin. Vous m'avez donné le courage et la motivation pour accomplir ce travail et je vous en remercie du plus profond de mon cœur.

PS : J'aimerais exprimer une petite pensée à ce drone *Skywalker X6_12* qui m'a accompagné pendant un temps lors de la campagne de vol à la Barbade. Tu as été le premier à avoir touché un nuage et tu as réussi à nous redonner foi en notre projet. Malheureusement, nous avons puisé dans les derniers milliampères de ta batterie et j'en suis désolé... tu est donc également le premier drone à être rentrer

jusqu'à la côte à la nage. Mes collègues m'ont même affirmé que tu surfais mieux que moi ! Malheureusement, même si tu as parfaitement réussi à prendre le swell, tu ne t'en est pas sortie indemne. RIF *X6_12* (Rest In Flight) !

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Motivations	3
1.2	Problématiques	3
1.3	Objectifs	4
1.4	Contributions	5
1.5	Structure du manuscrit	7
2	État de l'art	9
2.1	Contexte	9
2.1.1	Les nuages : un environnement complexe à comprendre	10
2.1.2	Utilisation de drones pour l'observation et l'échantillonnage de phénomènes atmosphériques	10
2.1.3	Les projets Voltige et SkyScanner	12
2.1.4	Le projet NEPHELAE	14
2.1.4.1	Les partenaires et les rôles de chacun	15
2.1.4.2	Les objectifs du projet	16
2.2	Exploration d'environnements inconnus	16
2.2.1	Exploration d'environnements statiques	16
2.2.2	Exploration d'environnements dynamiques	17
2.2.3	Exploration par des systèmes multi-robots	18
2.2.4	Cas des flottes d'UAVs	20
2.2.4.1	Algorithmes de guidage et de contrôle	20
2.2.4.2	Planificateur de tâches et de trajectoires	21
2.2.4.3	A la recherche d'optimalité	22
2.3	Architecture	23
2.3.1	Définition	23
2.3.2	Notion de distribution	24
2.3.3	Implication pour une flotte de drones	27
2.3.3.1	Organiser les communications	27
2.3.3.2	Répartir les fonctions	30
2.4	Synthèse de l'état de l'art	33
3	Architecture développée	35
3.1	Méthodologie	35
3.2	Contraintes associées aux missions d'exploration d'environnements dynamiques	37
3.2.1	L'utilisation de drones spécifiques pour explorer des nuages	37
3.2.2	Pallier les contraintes de communication dans de telles missions	41
3.3	Modélisation des nuages	41
3.4	Architecture du système	43

3.4.1	Architecture idéale	43
3.4.2	Architecture effectivement déployée	46
4	Motifs de navigation adaptatifs pour l'exploration d'environnements dynamiques	49
4.1	Mise en place de la stratégie d'exploration globale	49
4.1.1	Définition de zones d'intérêt	50
4.1.2	Opération type, plan de vol et séquençement des tâches	51
4.1.3	Schémas de vol basiques intégrés autopilotes	53
4.1.4	Module de détection	54
4.2	Motifs adaptatifs	54
4.2.1	Le Lace	62
4.2.2	Le Trinity	65
4.2.3	Le Rosette	69
4.2.4	Spirale conique oblique	73
5	Résultats	75
5.1	Validation des schémas adaptatifs avec des simulations	75
5.1.1	Établissement d'un simulateur global	76
5.1.1.1	Simulation de l'avion	76
5.1.1.2	Utilisation de MesoNH et CAMS	76
5.1.2	Les résultats des motifs de navigation en simulation	77
5.1.2.1	Les simulations statiques	78
5.1.2.1.1	Simulation 20 minutes	78
5.1.2.1.2	Simulations courtes	83
5.1.2.1.3	Quelques statistiques	86
5.1.2.1.4	Cas d'erreurs dans la logique du schéma	88
5.1.2.2	Des cas plus complexes en simulation dynamique	88
5.1.2.2.1	Simulations dynamiques du <i>Lace</i>	91
5.1.2.2.2	Simulations dynamiques du <i>Trinity</i>	93
5.1.2.2.3	Simulations dynamiques du <i>Rosette</i>	95
5.1.2.2.4	Quelques statistiques	99
5.1.2.2.5	Cas d'erreurs dans la logique du schéma	100
5.1.3	Simulations hybrides	100
5.2	Campagne de vols expérimentales à la Barbade	103
5.2.1	Contexte	103
5.2.2	Déroulement d'une opération de vol typique	106
5.2.3	Données collectées et trajectoires résultantes des motifs de vol adaptatifs	108
5.2.3.1	Filtrage des données du capteur de nuage	108
5.2.3.2	Analyse des trajectoires résultantes d'exploration de nuage	110
5.2.3.3	Résultats des vols multi-drones	118
5.2.4	Résumé de la campagne	119

5.2.5	Les améliorations post-campagne	121
6	Discussions et perspectives	125
6.1	Discussions	125
6.1.1	Les schémas de vol adaptatifs pour l'exploration d'environnements inconnus dynamiques	125
6.1.2	L'architecture développée du système	127
6.2	Perspectives	128
7	Conclusion	133
7.1	Problématique et synthèses des chapitres	133
7.2	Bilan méthodologique	134
7.3	Résultats et contributions	135
	Annexes	137
A	Présentation générale de Paparazzi	139
A.1	Le plan de vol	139
A.2	Le mode mission	140
	Bibliographie	141

Glossaire

- CNRM** Centre National de Recherche Météorologique. 12, 15, 42
- ENAC** École Nationale de l'Aviation Civile. 1, 12, 15, 38
- ENM** École Nationale de Météorologie. 12
- LAAS** Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes. 1, 12, 15, 36, 46
- LWC** Liquid Water Content. 42, 46, 50, 51, 54, 55, 58, 59, 65, 74, 105, 106, 108, 110, 111, 113, 114, 122, 129
- NEPHELAE** Network for studying Entrainment and microPHysics of cLouds using Adaptive Exploration. 1, 5–10, 14, 15, 35, 37, 39, 40, 42, 46, 47, 75, 76, 101, 103, 104, 110, 119, 120, 126–128, 130, 131, 133
- PPRZ** Paparazzi open source autopilot. 6, 15, 36, 46, 53, 76, 89, 106, 119, 128, 135
- UAV** Unmanned Aerial Vehicle. 6, 10–12, 14, 17, 19–22, 29, 30, 32, 37, 39–43, 45, 46, 53, 55, 58, 106, 113, 114, 118–120

Avant-propos

La robotique est un domaine en pleine expansion, notamment avec les drones qui s'invitent de plus dans notre quotidien. Qu'ils soient à destination du grand public pour le loisir avec les récents modèles de DJI et Parrot ou pour des applications commerciales comme la livraison de colis, ils ne cessent d'évoluer ; ce qui n'était que pure fantaisie il y a quelques années devient maintenant une banalité. Cette technologie est largement maîtrisée et chaque jour de nouvelles applications utilisant des drones émergent. Bien que les drones ne soient pas encore omniprésents dans notre quotidien, il ne serait pas étonnant dans les futures années que le ciel de nos villes en soit rempli. Cependant de nombreuses améliorations sont encore nécessaires afin de pouvoir réaliser de telles applications tout en assurant la sécurité des vols.

Le travail présenté dans ce manuscrit est la concrétisation de trois années de doctorat sur des thématiques mixant drone, robotique, intelligence artificielle et science de l'atmosphère. J'ai effectué cette thèse au *Laboratoire Drone* de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) et au *Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS-CNRS)* à Toulouse, de novembre 2017 à décembre 2020, sous la supervision de M. Gautier Hattenberger et M. Simon Lacroix. Le sujet de ma thèse porte sur le développement et l'implémentation d'une architecture logicielle distribuée pour permettre l'observation et l'étude d'un environnement 3D fortement dynamique à l'aide d'une flotte de drones. Ces travaux ont été co-financés par la région Occitanie et l'Université de Toulouse. De plus, ils s'appuient sur le projet [NEPHELAE](#) qui a pour objectif de déployer une flotte de drones afin d'échantillonner l'évolution d'un nuage.

La principale contrainte de ces environnements dynamiques vient de leur évolution rapide dans l'espace et dans le temps. L'exploration de tels phénomènes nécessite la mise en place d'une flotte de drones qui permet alors d'assurer une couverture spatiale et temporelle bien supérieure, ainsi que des acquisitions de données synchronisées, impossible à réaliser avec un unique drone. En dehors des problématiques liées au contrôle et à la planification de tâches pour une flotte, la principale difficulté de ce travail a été de développer de nouvelles stratégies d'exploration afin de s'adapter au nuage. L'implémentation de schémas de vol embarqués asservis sur les données des capteurs représente la principale contribution de la thèse.

L'ensemble de ces travaux est accompagné d'une forte composante expérimentale, notamment grâce à la possibilité d'utiliser des sites régionaux pour mettre en place des vols de tests en conditions réelles (Centre de Recherche Atmosphérique de Lannemezan). Le projet [NEPHELAE](#) m'a permis d'avoir littéralement "la tête dans les nuages" avec la campagne de vols à la Barbade qui a été l'une des expériences les plus incroyables de ma jeune vie de chercheur. Ce séjour en tant que chercheur de terrain et mon rôle d'opérateur de drones représente à mes yeux la concrétisation de tout ce travail et une expérience qui restera gravée à tout jamais dans ma mémoire.

Introduction

1.1 Motivations

Les améliorations réalisées ces dernières années sur les systèmes de drones ont permis d'atteindre un point où leur utilisation est maintenant très répandue dans de nombreux domaines et pour des applications très variées. Les constructeurs grand public construisent des systèmes facilement opérables permettant d'aisément piloter un drone. Pour les chercheurs, les drones sont une opportunité d'embarquer des capteurs et de réaliser des mesures qui jusque là n'étaient possibles qu'avec des systèmes complexes et onéreux. Bien que les missions impliquant un drone unique soient maintenant devenues courantes, le déploiement d'une flotte permettant de répondre à des missions plus complexes reste encore peu répandu. Les applications concernées sont principalement restreintes à des activités de cartographie d'environnements pas ou peu dynamiques et la question de l'exploration d'environnements fortement dynamiques avec une flotte de drones pose encore de nombreuses difficultés.

Ces missions d'observation et d'exploration présentent des intérêts dans différents domaines. Les drones pourraient servir dans un cas de pollution marine où une flotte permettrait de suivre plus efficacement plusieurs nappes de polluants simultanément. Ils pourraient également permettre d'anticiper les déplacements d'un feu de forêt en combinant leurs observations, les images satellites et les mesures provenant de stations sols [Bailon-Ruiz 2018, Bit-Monnot 2018]. De tels systèmes seraient aussi utiles pour l'observation d'émissions de polluants dans les villes ou au dessus des sites industriels pour évaluer les risques sur les populations des retombées après un accident.

Une des applications très intéressante est la modélisation et l'étude des processus mis en jeu dans la formation et l'évolution des phénomènes météorologiques, tels que le brouillard et les nuages : cela intéresse beaucoup les scientifiques de l'atmosphère, auxquels il manque encore de nombreuses données pour mieux comprendre et modéliser les phénomènes microphysiques liés à l'évolution des nuages.

1.2 Problématiques posées par l'exploration de phénomènes atmosphériques

De récents travaux impliquant des météorologues (projet Voltige et projet Sky-Scanner, section 2.1.3) et différents partenaires ont abordé la problématique de l'ob-

servation des nuages. Les résultats ont permis d'acquérir une meilleure compréhension des contraintes et des difficultés à réaliser une mission aussi complexe. Du point de vue de l'architecture de la flotte, ces projets ont mis en place des algorithmes de planification de trajectoires et de communication centralisée. Les échanges directs entre drones étaient impossibles et nécessitaient de passer par la station sol. Ces précédents travaux ont fait émerger deux problématiques.

La première problématique est liée à l'exploration d'un phénomène fortement dynamique. Comment un drone peut-il suivre un phénomène qui évolue dans le temps et dans l'espace? Ce genre de phénomène étant très difficile à modéliser et donc à anticiper dans le cas des nuages, quelle stratégie adopter pour maximiser la quantité d'informations collectées? Les connaissances sur l'exploration intelligente de nuages étant encore très limitées, le support fourni par les scientifiques de l'atmosphère sur ce projet permettra de définir des stratégies d'exploration adaptées à chaque situation d'observation.

La seconde porte sur l'architecture devant être mise en place pour répondre au mieux aux contraintes d'une telle mission. Quelle architecture peut permettre une coordination au sein du groupe de drones pour compléter une tâche complexe? Quelles informations doivent-ils partager entre eux? Comment la décision est-elle prise au sein du groupe? Doit-il y avoir un leader? La problématique concernant l'architecture est réelle et nécessite de bien définir les choix possibles pour l'architecture de communication et la répartition des décisions notamment.

L'objet de la thèse est de développer des stratégies satisfaisant les contraintes et les objectifs d'une mission d'exploration d'un environnement dynamique tout en conservant une approche distribuée pour le développement de l'architecture, apportant ainsi des premières réponses aux problématiques de partage de l'information, de communication et de décision.

1.3 Objectifs

Pour répondre à la première problématique, les drones doivent être capables de naviguer de façon autonome dans le nuage. Il faut donc définir des schémas de vol permettant de réaliser des trajectoires qui s'adaptent aux données collectées de façon à suivre l'évolution dynamique du phénomène.

L'une des solutions pour répondre à la deuxième problématique est de créer une flotte capable de se coordonner de façon à se répartir les différentes zones d'intérêts où effectuer des mesures. Les informations locales acquises et partagées par les drones, couplées à des modèles à priori du phénomène à observer doivent permettre de synthétiser toutes les données et de construire une cartographie de l'environnement. La quantité d'informations à traiter et à échanger pouvant nécessiter une puissance de calcul élevée et une large bande passante, une attention particulière doit être portée sur la conception de l'architecture du système et du réseau de communication. À terme, on vise un développement d'une architecture distribuée, dans laquelle chaque action devant être réalisée par un agent est décidée collectivement.

Le projet de thèse a pour objectif global de fournir un ensemble d'outils et d'algorithmes permettant le déploiement d'une flotte de drones pour des missions d'observation de phénomènes qui évoluent dans l'espace et dans le temps. L'architecture de ce système doit être ainsi définie par l'organisation de ces outils et algorithmes. Cette thèse étant fortement liée au projet [NEPHELAE](#), les travaux réalisés ont été principalement menés dans le contexte de l'observation de phénomènes atmosphériques, qui présentent beaucoup de contraintes. Les objectifs de [NEPHELAE](#) sont les suivants :

- L'étude et le développement d'une méthodologie d'analyse de la mission à effectuer. Entre autres, cela permet la modélisation des flux de données et l'adaptation de l'architecture du système en fonction des ressources de calcul nécessaires et des contraintes de communication liées à l'environnement à explorer.
- La mise en place d'une interface de haut niveau pour le contrôle de la flotte. En effet, les modèles d'évolution de ces phénomènes dynamiques n'étant pas encore très connus, un opérateur est plus apte à contrôler la flotte qu'un modèle peu précis. L'expertise et l'attention de cet opérateur doit donc porter sur la nature de la mission et non pas sur le contrôle de la flotte.
- Le développement d'algorithmes distribués pour le pilotage de la flotte. Ces algorithmes doivent être en charge de traduire les ordres de haut niveau donnés par les opérateurs en tâches à réaliser par un drone spécifique. Afin de répartir équitablement les tâches entre les différents agents qui composent la flotte, la décision concernant une tâche doit être prise de façon collective en tenant compte de la situation de chacun.
- La création de nouvelles fonctions de navigation (ou schémas de vol) à intégrer dans le logiciel autopilote embarqué du drone. En effet, adapter la trajectoire d'un drone en temps réel en fonction des données collectées par un opérateur semble une tâche fastidieuse mais faisable, pour un unique drone. Dès lors qu'il s'agit de piloter une flotte de drones dans un phénomène dynamique qui demande une adaptation rapide en temps réel, cette tâche n'est plus réalisable. De ce fait, de nouvelles fonctions de navigation doivent être créées pour permettre aux drones d'adapter leur trajectoire de façon autonome en fonction de l'évolution du phénomène.

1.4 Contributions

Cette thèse s'inscrit donc directement dans le cadre du projet [NEPHELAE](#). Les contributions développées pendant ces trois années sont les suivantes :

- Définition avec les scientifiques de l'atmosphère d'une stratégie d'exploration permettant de récolter des données intéressantes dans un nuage. En trouvant un compromis entre les besoins des météorologues et les possibilités proposées par les experts en drone, nous avons défini différentes zones d'intérêt à explorer dans un nuage.

- Conception et implémentation des schémas de vol adaptatifs de suivi de nuages, intégration au sein du système Paparazzi. Paparazzi (PPRZ) est un projet open source proposant différents matériels et logiciels pour l'utilisation de drones autonomes ou Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Il a comme objectif principal de permettre leur déploiement.
- Participation au développement des drones conçus spécifiquement pour l'exploration de nuages et à la définition de l'architecture globale du système "flotte de drones" pour NEPHELAE, permettant aussi bien de déployer la flotte en simulation qu'en conditions réelles.
- Enfin, une grande contribution sur ce projet a été le travail apporté avant et pendant la campagne d'expérimentation à la Barbade. Des essais préalables à la campagne en conditions réelles (à Lannemezan) nous ont permis d'identifier les faiblesses de notre architecture et des schémas adaptatifs. Il a donc été nécessaire de trouver et d'implémenter des solutions pour les rendre plus robustes. Un soin particulier a été apporté à la création de plans de vol complexes spécifiques à la zone de vol de la Barbade de façon à pouvoir faire évoluer les drones en toute sécurité. Pendant la campagne, j'ai joué le rôle de télé pilote, et étais responsable du contrôle de la flotte. De nombreuses modifications et ajustements ont été réalisés sur le terrain au cours de la campagne.

Les publications scientifiques auxquelles j'ai participé sont les suivantes :

- Conférence IMAV 2018 – Co-auteur d'un article d'Aurélien Cabarbaye, présentant une nouvelle méthode pour créer une loi de contrôle et l'observateur associé afin de stabiliser un drone [Cabarbaye 2018]. En couplant l'angle d'incidence, la vitesse air et le vecteur d'état d'un drone, on peut le contrôler en descente, facilitant ainsi le guidage qu'on soit en pilotage automatique ou en manuel. Ma participation sur cet article était principalement liée à l'implémentation de cette loi de contrôle et de l'observateur dans le système PPRZ.
- Conférence ICUAS 2019 – Premier auteur d'un article sur la création et le développement des schémas de vol adaptatifs pour l'exploration d'un environnement dynamique et plus particulièrement d'un nuage [Verdu 2019]. Cet article présente tout d'abord les différentes zones d'intérêt à explorer dans un nuage ainsi que les trajectoires les plus adaptées à chaque zone. Il introduit ensuite les schémas adaptatifs nommés *Lace* et *Rosette*. La fin de l'article présente les premiers résultats en simulation de l'exécution de ces trajectoires adaptatives dans un nuage statique simulé.
- Conférence IMAV 2019 – Co-auteur d'un article qui présente le design et l'utilisation d'un mini drone dédié à la recherche atmosphérique [Cabarbaye 2019]. Ce drone répond à un cahier des charges très contraignant préalablement établi par les scientifiques de l'atmosphère qui connaissent bien les besoins pour de telles missions. Ma contribution reprend une présentation succincte des trajectoires adaptatives.

- Conférence ISARRA 2019 – Premier auteur d’un poster présentant le développement et la stratégie des schémas de vol adaptatifs lors d’une conférence sur l’utilisation des drones dans la science de l’atmosphère.
- Conférence IROS 2020 – Premier auteur d’un article sur les résultats obtenus avec l’utilisation des schémas de vol adaptatifs lors de la campagne expérimentale de vols réalisée à la Barbade [Verdu 2020]. Il rappelle dans un premier temps les zones d’intérêt et l’ensemble des schémas de vol adaptatifs et géométriques associés aux zones. Ensuite, il introduit un nouveau schéma de vol adaptatif nommé *Trinity*. Il expose une méthode de validation de ces nouvelles trajectoires à travers des simulations statiques, dynamiques et même hybrides. Pour finir, il présente la campagne à la Barbade dans le cadre du projet NEPHELAE. Cette dernière partie se termine sur une analyse des trajectoires résultantes des schémas de vol adaptatifs déployés lors de cette campagne. Une version mise à jour de cet article sera publiée en 2021 [Verdu 2021].

1.5 Structure du manuscrit

Ce chapitre permet de donner un premier aperçu du sujet de la thèse.

Le second chapitre est d’abord composé de la présentation du contexte de ce projet de thèse. Il expose les résultats et problématiques soulevées lors de précédents projets similaires et donne des détails sur le projet NEPHELAE. Dans un second temps, il présente un état de l’art des différents axes et domaines de recherches relatifs au sujet de la thèse.

Le troisième chapitre présente l’architecture globale développée pour réaliser des missions d’exploration dynamique. Il décrit dans un premier temps la méthodologie utilisée pour le projet et les contraintes liées aux missions considérées. Il apporte ensuite des détails sur les méthodes employées pour modéliser un nuage et liste les différentes fonctionnalités nécessaires au système. Pour finir, il énonce l’approche choisie et expose l’architecture du système développé.

Le quatrième chapitre explique en détail le développement des schémas de vol adaptatifs, destinés à être exécutés par des drones autonomes pour échantillonner certaines zones d’un nuage. Il commence par une chronologie des réflexions et développements sur ces schémas de vol particuliers. Il met ensuite en avant la mise en place d’une stratégie d’exploration dédiée à la collecte de données dans un nuage. Il présente notamment l’approche employée pour détecter les nuages, organiser les tâches et les insuffisances des schémas de vol classiques pour réaliser des missions d’exploration d’environnements dynamiques. Pour finir, il expose en détail le fonctionnement des trois motifs de vol adaptatifs. Un premier logigramme permet de cerner la logique derrière ces fonctions de navigation, puis le pseudo-code de chaque partie du logigramme est commenté pour les trois schémas développés, le *Lace*, le *Rosette* et finalement le *Trinity*. Ce chapitre présente des illustrations théoriques représentatives du comportement des drones pendant l’exécution de ces schémas.

Le cinquième chapitre présente l’ensemble des résultats obtenus avec ces fonc-

tions de navigation adaptatives. Il commence par l'approche choisie pour valider ces motifs à travers différentes simulations sur des nuages statiques, puis dynamiques et pour finir sur des simulations hybrides mêlant nuages simulés et drone réel. Par la suite, il détaille tous les aspects de la campagne de vols réalisée sur l'île de la Barbade dans le cadre du projet **NEPHELAE**. Il expose les contraintes, les difficultés et problèmes rencontrés durant la campagne, ainsi que les résultats obtenus par les schémas de vol adaptatifs lors d'exploration de nuages réels. Ce chapitre se termine par une présentation des améliorations réalisées suite aux problèmes rencontrés pendant la campagne.

Le sixième chapitre est dédié aux diverses discussions sur le travail effectué pendant cette thèse et aux perspectives envisagées pour le futur. Il propose dans un premier temps une analyse critique des résultats obtenus sur les trajectoires d'exploration en montrant notamment l'originalité de ces travaux. Il émet ensuite des hypothèses sur les spécificités d'utilisation de chaque schéma adaptatif et ouvre vers d'éventuelles nouvelles applications. La seconde partie permet une discussion plus globale sur la création de l'architecture pour le système. Enfin, la dernière section présente les améliorations concevables sur différents aspects du système, que ce soit sur la logique même des schémas de vol adaptatifs, les capteurs utilisés ou encore sur le développement d'algorithmes rendant l'architecture plus distribuée.

Pour terminer, le septième chapitre conclut ce rapport. Il rappelle les problématiques et les objectifs du projet avant de synthétiser les différentes conclusions des chapitres précédents. Il dresse ensuite un bilan des différents obstacles rencontrés et liste les solutions mises en place. Pour finir, l'ensemble du travail est positionné par rapport aux deux principales problématiques et une conclusion sur les contributions de cette thèse est apportée.

État de l'art

Contents

2.1	Contexte	9
2.1.1	Les nuages : un environnement complexe à comprendre . . .	10
2.1.2	Utilisation de drones pour l'observation et l'échantillonnage de phénomènes atmosphériques	10
2.1.3	Les projets Voltige et SkyScanner	12
2.1.4	Le projet NEPHELAE	14
2.2	Exploration d'environnements inconnus	16
2.2.1	Exploration d'environnements statiques	16
2.2.2	Exploration d'environnements dynamiques	17
2.2.3	Exploration par des systèmes multi-robots	18
2.2.4	Cas des flottes d'UAVs	20
2.3	Architecture	23
2.3.1	Définition	23
2.3.2	Notion de distribution	24
2.3.3	Implication pour une flotte de drones	27
2.4	Synthèse de l'état de l'art	33

Ce chapitre présente dans un premier temps le contexte dans lequel cette thèse s'inscrit. Il résume les différents projets menés au laboratoire sur les mêmes thématiques, et présente le projet NEPHELAE qui a défini le cadre des travaux : les objectifs du projet et les rôles de chaque partenaire sont décrits. Dans un second temps, le chapitre expose un aperçu de l'état de l'art des différents domaines de recherches liés à la problématique générale de la thèse : les méthodes utilisées pour explorer des environnements dynamiques avec un groupe de robots ou une flotte de drones. Enfin, une section est consacrée aux architectures qui intègrent ces méthodes en insistant sur les architectures distribuées, puis une dernière section synthétise l'état de l'art.

2.1 Contexte

Cette thèse s'inscrit dans le contexte particulier de l'exploration de phénomènes atmosphériques par des drones. Elle hérite de précédents travaux qui ont permis d'avoir un premier aperçu des difficultés liées à l'exploration des nuages et a été

réalisée dans le contexte d'un projet plus large sur la science de l'atmosphère, NE-PHELAE. Le travail réalisé pendant cette thèse a donc deux objectifs. Tout d'abord, trouver de nouvelles stratégies d'exploration et implémenter de nouvelles fonctions de navigation pour le projet ; et ensuite dépasser le cadre existant basé sur une architecture centralisée en explorant de nouvelles pistes pour construire une architecture distribuée.

2.1.1 Les nuages : un environnement complexe à comprendre

[Siebesma 1998] présentent différents phénomènes atmosphériques typiques des tropiques et latitudes moyennes. [Wallace 2006] permettent d'apporter des connaissances sur les sciences de l'atmosphère. [Burnet 2007] mettent en relation différents phénomènes microphysiques liés au développement de nuages convectifs. Les travaux présentés par [Rauber 2007], dans le cadre de la campagne d'expérimentation RICO, mettent l'accent sur la caractérisation des cumulus pour une meilleure compréhension du climat. Cette campagne de mesures qui a déployé des avions et des bateaux lourdement instrumentés a été une source d'inspiration pour la campagne réalisée dans le cadre du projet NEPHELAE. [Plate 2012] proposent un livre qui résume les études interdisciplinaires des effets de la flottabilité dans différents milieux, sur une large gamme d'échelle, par différentes méthodes de recherche et dans différents domaines d'applications. [Rooy 2013] donnent un aperçu historique des recherches sur les processus de mélange dans les nuages. Ils mettent également en lumière les développements plus récents visant à améliorer la représentation de l'entraînement et du déentraînement dans les modèles des nuages. [Mechoso 2014] présentent des recherches visant à améliorer la compréhension et la modélisation du système atmosphérique d'une zone géographique. Les deux objectifs fondamentaux sont l'amélioration des simulations des modèles d'interaction océan-atmosphère et l'amélioration des estimations des effets des aérosols sur les nuages. Les divers travaux de [Lamraoui 2014] pendant sa thèse ont permis de mieux comprendre les paramètres microphysiques des nuages. Cet auteur a notamment apporté une contribution importante dans le cadre du projet SkyScanner. Les travaux présentés dans [Li 2016] montrent l'efficacité des radars pour étudier des phénomènes météorologiques divers.

2.1.2 Utilisation de drones pour l'observation et l'échantillonnage de phénomènes atmosphériques

Comme l'exploration d'un nuage est possible grâce aux progrès de la science des drones, plusieurs scientifiques ont développé des méthodes et des algorithmes pour recueillir des informations au sein d'un nuage.

Dans une campagne impliquant des UAVs, [Corrigan 2008] ont étudié l'interaction entre les aérosols, les nuages et les effets radiatifs.

[Elston 2011] présentent des résultats de déploiements sur le terrain d'un système de drones pour effectuer l'échantillonnage in-situ de phénomènes météorologiques. Ils s'intéressent en particulier aux environnements présentant des phénomènes de

super cellules orageuses.

[Rogers 2013] utilisent la signature acoustique d'un UAV lorsqu'il vole au dessus de microphones au sol afin de reconstruire des profils 3D de températures et des cartes de vents.

[Silva 2015] ont utilisé une double synthèse Doppler afin d'obtenir un champ de vent tridimensionnel et une information régionale du mouvement vertical de l'air. Ils ont combiné ces données avec le planificateur atmosphérique en ligne (AMOP) qui simule un modèle météorologique dynamique, afin d'effectuer une prévision des mouvements du vent et des phénomènes atmosphériques. Ils ont également utilisé une base de données sur le champ de vent pour stocker et traiter les données atmosphériques en temps réel. Leurs drones intègrent une sonde à 5 trous qui est capable de fournir des estimations tridimensionnelles du vent autour de l'avion. Leur travail utilise plusieurs capteurs au sol et une architecture centralisée pour construire le modèle et traiter les données recueillies.

[Egorova 2016] fournissent une estimation en temps réel de la concentration d'un panache gazeux en utilisant des UAVs avec des capteurs de concentration. Cette approche utilise la combinaison du guidage du drone et de la performance de l'estimateur pour atteindre la source du panache.

[Rodriguez 2016] présentent une méthode pour caractériser et cartographier le vent d'un environnement inconnu. L'estimation du vecteur vent est vraiment importante pour la collecte d'énergie et la planification du trajet du drone. Généralement, la méthode pour générer la carte du vent consiste à mesurer le vecteur vent à un ou plusieurs endroits fixes. Ici, la méthode proposée génère la carte des vents à différents endroits et à différentes altitudes le long de la trajectoire de l'UAV. Tout d'abord, les auteurs ont analysé quelle méthode pour l'estimation du vecteur vent a une corrélation directe avec la distribution de Weibull en analysant leurs graphiques de probabilité. L'utilisation des mesures du Global Navigation Satellite System fournit une mesure directe de la vitesse. Ensuite, en utilisant la méthode de calcul direct, ils ont prouvé qu'il est possible d'estimer le vecteur vent. Une fois ces données recueillies, une nouvelle méthode d'extrapolation est utilisée pour générer la carte des vents. Cette méthode est basée sur la distribution de Weibull et une loi de puissance empirique.

[Reineman 2016] proposent une approche pour guider une flotte d'UAVs autonomes afin de recueillir des données dans des cumulus. L'utilisation de processus gaussiens sur des mesures locales très rares permettent la construction d'une carte. La carte obtenue est exploitée par un planificateur de trajectoires basé sur un algorithme d'optimisation.

[Sanchez 2017] ont été dans les premiers à collecter des mesures dans les nuages avec des UAVs. Ils embarquent notamment un capteur d'extinction pour détecter les nuages et une sonde à 5 trous pour construire des cartes de vents. Ce travail démontre également la nécessité de collecter des mesures in-situ et de prendre en compte l'entraînement des nuages pour modéliser avec précision leur évolution.

2.1.3 Les projets Voltige et SkyScanner

La première collaboration sur les drones entre les équipes de l'ENAC et de Météo-France fut le projet VOLTIGE (Vecteurs d'Observation de La Troposphère pour l'Investigation et la Gestion de l'Environnement) entre 2012 et 2014. À cette époque, les scientifiques de l'atmosphère ont cherché à utiliser des drones comme outils afin d'améliorer les observations de différents phénomènes, en se basant sur le retour d'expérience de [Båserud 2016, Cuxart 2016, Kral 2018]

Les petits modèles d'UAVs sont particulièrement bien adaptés pour l'observation des processus de la couche limite atmosphérique ; ils permettent d'obtenir une résolution verticale et temporelle élevée. Ainsi, le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM), l'ENAC et l'École Nationale de Météorologie (ENM), à travers le projet VOLTIGE ont cherché à développer des drones adaptés à l'étude du cycle de vie du brouillard. À la suite de vols instrumentés, les scientifiques ont comparé les profils verticaux mesurés aux modèles de prévision de Météo France, et les résultats prouvent que ces modèles pourraient être améliorés à l'aide de mesures in situ à haute résolution spatiale et temporelle. Ce projet a permis de construire un premier drone à ailes volantes particulièrement bien adapté à l'exploration atmosphérique. En séparant les commandes de profondeur et d'aileron, cela a permis de réduire les bornes de l'angle de tangage et d'améliorer les mesures de turbulence. Le drone résultant de ce projet était capable de voler deux heures avec une charge utile de 150 grammes, tout en conservant un lancement à la main (contrainte régulière pour les missions typiques de recherches atmosphérique). Les données récupérées à hautes fréquences par les capteurs ont directement été liées au pilote automatique principal afin de synchroniser la navigation aux mesures de la charge utile. Ce premier projet a permis de construire des premiers vecteurs pour l'exploration atmosphérique et de mieux comprendre les difficultés d'une telle tâche. Des vols de démonstration jusqu'à trois avions suivant des plans de vols distincts et pré-établis ont été réalisés [Hattenberger 2013, Hattenberger 2014, Bronz 2014, Bronz 2015]].

À la suite du projet VOLTIGE centré sur la validation des capteurs météo embarqués sur micro-drones, le projet SkyScanner¹ (2014–2016) s'est concentré sur le pilotage d'une flotte de drones pour optimiser l'acquisition de données. Les drones au sein de cette flotte devaient coopérer afin d'échantillonner de façon adaptative des nuages de type cumulus. Le projet était donc divisé en plusieurs axes de recherches : la science de l'atmosphère (CNRM), l'aérodynamique des mini-drones et l'optimisation de leur conception (ONERA, ISAE), le contrôle des trajectoires de vol de ces mini-drones (ENAC), et enfin le développement d'algorithmes de contrôle de la flotte pour assurer un échantillonnage adaptatif (LAAS-CNRS). Ce projet a mêlé des recherches fondamentales avec des développements technologiques, le tout couplé à des simulations et des expérimentations. L'architecture mise en place (voir la Figure 2.1) était totalement centralisée, à la fois pour la tâche de cartographie en temps réel des nuages et la planification des trajectoires des avions. Pour cette dernière partie, c'est un compromis entre la

1. <https://www.laas.fr/projects/skyscanner/>

consommation énergétique et la prise d'informations nouvelles, en se basant sur une carte d'incertitude dynamique, qui a été retenu comme critère d'évaluation [Lauda 2016, Bailon-Ruiz 2017, Renzaglia 2016, Reymann 2018]. On peut noter ici que l'utilité globale d'une trajectoire n'est pas uniquement liée à la couverture géographique d'une zone comme cela peut être le cas dans d'autres domaines tels que l'agriculture.

La principale avancée de ce projet a été l'acquisition d'une très bonne connaissance de l'ensemble des problèmes à résoudre pour concevoir un système d'acquisition de données atmosphériques composé d'une flotte de drones.

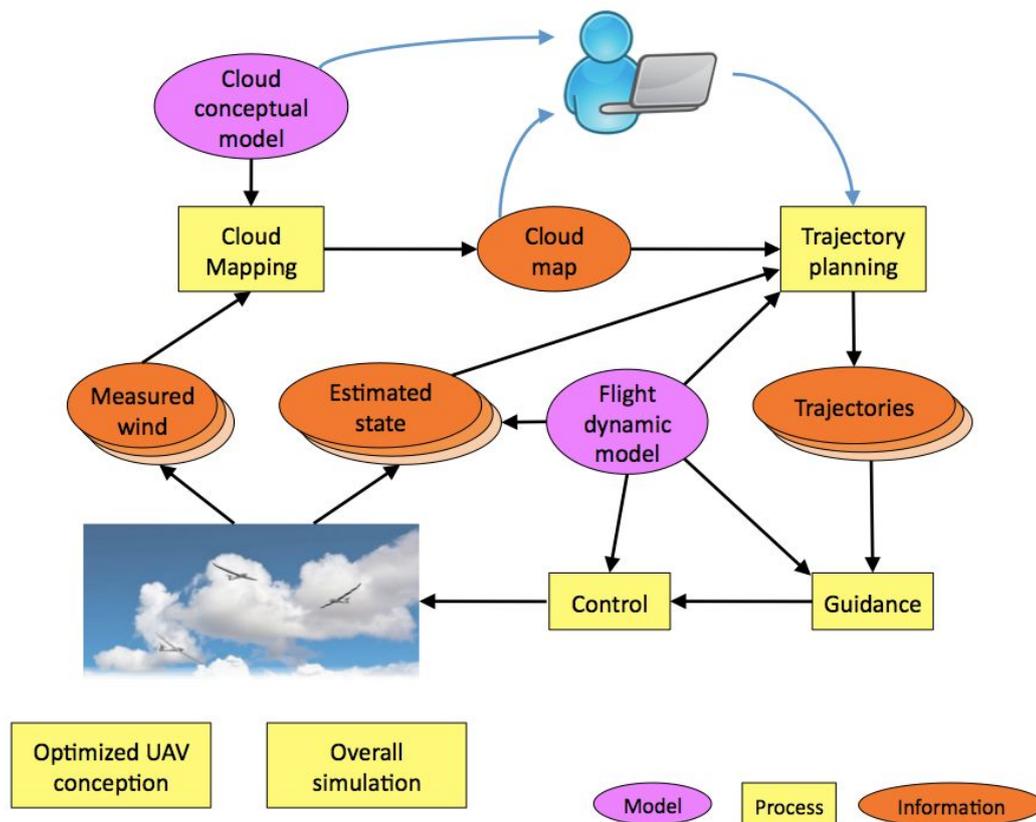


FIGURE 2.1 – Architecture du système créé lors du projet SkyScanner

2.1.4 Le projet NEPHELAE

De nos jours, les modèles atmosphériques utilisés pour réaliser des prédictions météorologiques ou pour comprendre les changements climatiques souffrent grandement d'un manque de données. En effet, les moyens utilisés pour obtenir des mesures des caractéristiques d'un nuage ne sont pas suffisants pour affiner ces modèles. L'utilisation de systèmes de capteurs statiques tels que des stations sols équipées de radars ou encore l'utilisation de satellites permettent seulement d'obtenir une image globale des phénomènes nuageux présents dans la zone. Des approches se servant de ballons sondes et d'avions embarquant des capteurs atmosphériques permettent de récupérer des informations directement dans les nuages, mais leurs trajectoires ne peuvent pas s'adapter facilement à la situation (profils verticaux pour les ballons sondes et "va et vient" pour les avions); il en résulte un échantillonnage incomplet. Il est clair que les plus gros défauts de ces méthodes viennent de l'incapacité des vecteurs à suivre l'évolution du phénomène avec des trajectoires complexes. Ce manque de données adéquates de la dynamique des nuages et des paramètres microphysiques clés qui régulent la formation de nuages a créé une divergence dans la formulation des modèles de nuages. Le projet **NEPHELAE** (Network for studying Entrainment and microPHysics of cLouds using Adaptive Exploration – ce nom est une référence aux nymphes grecques de la pluie et des nuages) est un projet financé par l'ANR qui a débuté en 2017 et se terminera en 2021. Son but est de créer une caractérisation spatio-temporelle 4D complète de la microphysique et de la dynamique de la formation des nuages. Afin d'atteindre ce but, le projet **NEPHELAE** repose sur le développement d'une flotte autonome d'UAVs qui se coordonne en temps réel comme un réseau d'agents intelligents, afin de pouvoir explorer et suivre l'évolution des nuages. La Figure 2.2 montre l'ensemble de l'équipe participant au projet **NEPHELAE**.



FIGURE 2.2 – Présentation de l'équipe **NEPHELAE** et de l'équipe **BOREAL** participant à la campagne de vols à la Barbade

2.1.4.1 Les partenaires et les rôles de chacun

Le but du projet **NEPHELAE** étant de construire une flotte de drones capable d'explorer un nuage et de récupérer des données atmosphériques, il implique plusieurs entités de recherches, chacune experte dans son domaine. Les différents partenaires du projet et leurs rôles sont les suivants :

- **CNRM**, expert en science météorologique : le Centre National de Recherche Météorologique se concentre sur l'étude des aérosols, de la microphysique des nuages et des précipitations afin de construire des modèles de prévision météorologique et des modèles d'évolution du climat. Leurs rôles dans le projet est de développer des capteurs adaptés aux mesures des caractéristiques des nuages, de les intégrer dans les drones, d'analyser les données recueillies et de construire de nouveaux modèles de nuages en se basant sur des travaux précédents. Leur travail est axé autour de deux objectifs : mieux comprendre les mécanismes dynamiques qui jouent un rôle dans l'évolution des nuages et définir la meilleure stratégie à employer pour échantillonner au mieux le nuage selon son état actuel.
- **LAAS-CNRS**, expert en robotique et cartographie : le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes travaille depuis de nombreuses années sur les différents types de systèmes : nano et micro-systèmes, systèmes embarqués, systèmes biologiques, systèmes autonomes, avec des applications diverses (aéronautique, espace, environnement, santé,...). Plus particulièrement, l'équipe RIS (Robotique et InteractionS) a une grande expérience en ce qui concerne l'ensemble des problèmes liés au déploiement d'équipes de robots : planification de mouvements coordonnés, planification de tâches coopératives, répartition et allocation de tâches et localisation multi-robots. Dans le cadre du projet **NEPHELAE**, le **LAAS** travaille sur la cartographie des nuages en temps réel en utilisant les mesures recueillies par le drone. Il participe également à la définition de la stratégie de vol adaptatif de la flotte pour cartographier l'évolution du nuage en s'appuyant sur l'expérience acquise au cours du projet SkyScanner.
- **ENAC**, expert en conception de drones et développement d'auto-pilotes (matériel et logiciel) : l'École Nationale de l'Aviation Civile est un établissement public sous la tutelle du Ministère de la Transition Écologique et plus particulièrement de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC). Le programme de recherche sur les drones de l'**ENAC** développe le système de pilotage automatique Paparazzi (**PPRZ**) depuis 2003 (<http://wiki.paparazziuav.org/>). Pour le projet **NEPHELAE**, l'**ENAC** se concentre sur la conception de la flotte de drones qui doit répondre aux contraintes liées à l'exploration des nuages, mais également sur l'intégration d'un système de communication longue distance pour des expérimentations réelles. Elle est également en charge du développement et de l'implémentation des fonctionnalités de navigation adaptative dans le système de pilotage automatique **PPRZ**.

2.1.4.2 Les objectifs du projet

D'un point de vue météorologique, l'objectif principal de ce projet est d'identifier clairement les phénomènes atmosphériques dominants dans l'évolution des nuages. Un second objectif concerne la construction d'un modèle d'évolution de nuage à l'aide des mesures réalisées. Afin de compléter ces objectifs, les chercheurs du domaine ont besoin de récupérer des données bien spécifiques à l'intérieur et aux frontières des nuages. De plus, il faut que ces données soient collectées avec une bonne résolution spatiale et temporelle.

En ce qui concerne le développement autour des drones, les objectifs sont répartis entre les différents acteurs du projet. L'objectif principal étant de développer une flotte de vecteurs embarquant divers capteurs capables de répondre au cahier des charges imposé par la mission. Le développement de nouvelles fonctions de navigation capables d'explorer un nuage est crucial dans la perspective d'une expérimentation réelle où les contraintes de communication imposent d'avoir un niveau d'autonomie suffisamment élevé.

La conception de l'architecture globale du système est un objectif en soi. Elle doit proposer une approche pour le contrôle d'une flotte de drones à partir des consignes de haut niveau données par les scientifiques en charge de l'étude des nuages. Il faut donc intégrer une interface pour l'utilisateur qui devra prendre des décisions en fonction des informations recueillies en temps réel et les présenter de manière synthétique grâce à un algorithme de cartographie dynamique. Les ordres de vol et la gestion de la flotte doivent pouvoir être assurés par un opérateur unique, imposant un haut niveau d'autonomie du système embarqué. Enfin, le réseau de communication doit être dimensionné pour assurer le contrôle de l'état des engins et la transmission des données des capteurs météo, sur des distances de plusieurs kilomètres de façon à pouvoir suivre les nuages portés par le vent. Par ailleurs, l'ensemble du système doit pouvoir être utilisé dans un environnement de simulation le plus réaliste possible afin de développer et tester toutes les nouvelles fonctionnalités.

2.2 Exploration d'environnements inconnus

L'exploration d'un environnement inconnu est une tâche complexe pour les systèmes robotiques et les drones. Ce type de mission nécessite de définir certaines stratégies, méthodes et modèles d'exploration en fonction du type d'environnement.

2.2.1 Exploration d'environnements statiques

Un environnement statique peut être considéré comme un environnement dans lequel rien ne change pendant le temps où l'agent l'explore. Certaines méthodes d'exploration ont été élaborées en commençant par développer des stratégies sur un environnement statique avant d'améliorer leurs capacités pour évoluer dans un environnement dynamique. C'est le cas de [Gao 2016] qui avaient d'abord travaillé sur le développement d'une méthode pour générer une trajectoire dans un environnement

inconnu statique avant de poursuivre leurs travaux dans des environnements dynamiques. Leur méthode utilisait une carte de nuage de points pour trouver un chemin sans collision, puis générer une trajectoire grâce à une optimisation permettant de garantir la fluidité et la sécurité du drone pendant son vol.

[Calderón-Arce 2018] présentent une méthode de coordination d'un essaim de robots (en simulation) pour trouver des chemins vers une cible spécifique dans des environnements statiques inconnus. En utilisant la carte de l'environnement et après avoir identifié les obstacles, les robots construisent un schéma adapté de graphiques aléatoires à exploration rapide. Puis un algorithme de planification permet de définir un itinéraire optimisé vers la cible.

2.2.2 Exploration d'environnements dynamiques

Un environnement dynamique tout comme les nuages, l'océan ou un environnement avec des obstacles en mouvement, implique que l'environnement à un moment donné ne sera pas exactement le même qu'à un moment précédent. Pour prendre en compte ces changements, l'agent doit utiliser des méthodes de planification de trajectoires réactives pour bien réagir aux différentes évolutions de son environnement.

Dans leur travaux [Weckesser 1996] introduisent les premières problématiques liées à l'exploration d'environnements dynamiques et inconnus par des robots. Ils soulèvent l'importance d'un système qui soit capable de s'adapter à des conditions environnementales changeantes.

[Billard 1999] présentent des expériences de cartographie d'un environnement dynamique grâce à un système de multi-robots adaptatif. Ils prouvent notamment que la construction d'une architecture distribuée permet aux robots de mettre à jour l'état de l'environnement même si celui-ci change régulièrement.

[Brink 2015] s'intéressent à des problématiques très similaires à la thèse. Leur travaux proposent une méthode pour suivre et estimer la frontière d'un panache de fumée dynamique avec un capteur mobile adaptatif et un réseaux de capteurs statiques.

[Wallar 2015] présentent une nouvelle méthode de planification pour une surveillance permanente des zones sensibles aux risques. Le planificateur créé, appelé *PARCov*, permet d'obtenir une couverture persistante tout en réduisant les risques et en maintenant une qualité élevée des données des capteurs. Cette méthode de planification est possible grâce à la combinaison de la mesure d'incertitude et d'un modèle de risque, généré par un algorithme utilisant une fonction de coût. Cette méthode permettrait d'éviter les interblocages (livelocks), mais ce partage d'informations rend cette architecture centralisée. Cette hypothèse peut être vérifiée dans l'expérience réelle où un ordinateur portable est utilisé avec *ROS* et *ZeroMQ-ROS* pour contrôler chaque UAV en fonction de leur position recueillie par les caméras de suivi.

[Sharma 2016] prouvent qu'une stratégie d'exploration efficace et une méthode de coordination améliorent l'autonomie et les performances des systèmes multi-robots.

[Gao 2017] ont fait évoluer leur travaux antérieurs sur la génération de trajec-

toires dans un environnement statique pour réagir et éviter les collisions en temps réel. Ils ont mis à jour leur génération de trajectoires basée sur l'optimisation pour prendre en compte les obstacles mobiles de l'environnement.

[Othmani-guibourg 2017] proposent une analyse des stratégies multi-agents pour patrouiller dans un environnement dynamique. Ils introduisent les stratégies existantes dans un graphe statique et montrent l'évolution à appliquer dans un graphe évolutif *Edge-markovian* (qui représente un environnement dynamique). Les résultats ont montré que les agents sont plus stables et plus adaptés à un environnement dynamique.

2.2.3 Exploration par des systèmes multi-robots

Pour l'exploration, et plus particulièrement pour une mission d'un système multi-robots, différentes méthodes d'exécution des tâches existent. Si une mission est considérée comme un plan d'action, il est important de définir comment l'équipe va partager ces différentes actions et quel est le travail de chaque entité. Dans la littérature sur la robotique, il apparaît que deux stratégies sont principalement utilisées : la coopération et la collaboration. Ces deux méthodes atteignent le même objectif, à savoir permettre à l'équipe d'atteindre un but commun, mais ce sont deux approches différentes. Leurs différences sont très subtiles et reposent sur le concept de processus de "partage". La littérature sur les méthodes d'apprentissage et de pédagogie aide à mettre en évidence la différence entre ces deux termes. D'après [Henri 1998, Davidson 2014] et le site web², les définitions communes sont les suivantes :

- **Coopérative** : la coopération repose sur une division des tâches où chaque entité sera responsable d'une action, d'une activité de l'objectif commun et permet à l'équipe de l'atteindre par la combinaison de ces sous-tâches (Figure 2.3 image de gauche).
- **Collaboratif** : la collaboration est basée sur le fait que chaque entité doit atteindre la même action individuellement. Même si elles y parviennent de manière différente, l'objectif commun sera atteint grâce à l'agrégation de toutes ces différentes formes d'action (Figure 2.3 image de droite).

Approche collaborative [Burgard 2005] ont travaillé sur la coordination multi-robots pour l'exploration d'un environnement inconnu. Ils ont présenté une technique permettant de coordonner une équipe de robots pendant qu'ils explorent leur environnement. L'idée est de prendre en compte simultanément le coût pour atteindre un lieu jusqu'alors inexploré et son utilité. Un premier algorithme a été développé et testé avec une portée de communication théorique illimitée. Ensuite, ces travaux ont été étendus à des portées de communication limitées. Les résultats montrent qu'une équipe de robots coordonnés peut certainement explorer plus rapidement un environnement inconnu qu'une équipe non coordonnée.

2. <https://sites.google.com/site/estesvedelimaana/concepts-et-enjeux/definition>

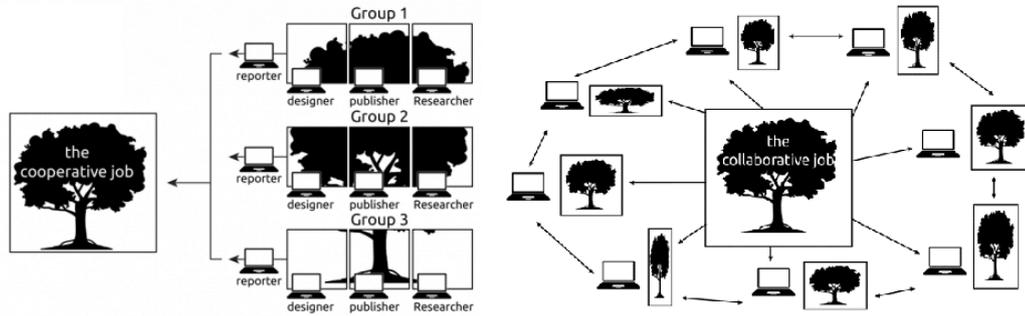


FIGURE 2.3 – La différence entre une tâche coopérative (à gauche) et collaborative (à droite) selon [Henri 1998].

[Gao 2017] ont proposé un cadre pour générer des trajectoires et supposent que cette méthode peut être étendue à plusieurs multi-rotors qui doivent travailler en équipe.

Approche coopérative [Lemaire 2004] supposent dans leur travail que certaines tâches ou certains comportements seront définis de manière coopérative. Comme la perception d'un environnement 3D qui nécessite de prendre plusieurs images à différents endroits, ou encore les contraintes de communication avec le sol qui conduiront à un comportement coopératif où le drone jouera le rôle de relais.

[Bryson 2007] a montré comment créer une architecture Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) de drone unique et comment l'utiliser pour agir de façon coopérative dans une architecture multi-véhicules. En effet, même si la carte est bien construite, le nœud central doit contrôler chaque UAV pour découvrir une partie inconnue de l'environnement et ainsi créer une coordination dans l'équipe multi-véhicules. Une fois que le nœud central a mis à jour la carte globale, il calcule quelle combinaison d'actions entraînera le gain d'informations le plus élevé dans la carte et envoie les commandes de trajectoire appropriées à chacun des véhicules.

[Wallar 2015] ont introduit une flotte de drones qui partagent les informations sur les temps d'attente, de sorte que tous les multi-rotors connaissent l'heure de la dernière visite de chaque région, ainsi que la fonction de coût. Ils agiront en coopération pour couvrir les zones non visitées sans avoir à se coordonner explicitement entre eux.

[Zufferey 2013] examinent les approches possibles pour permettre la coordination entre les différents drones d'une flotte. Le déploiement d'un essaim de drones au lieu d'un seul avion permet de couvrir rapidement une zone ou un volume plus important. Ils abordent notamment le défi de concevoir des comportements individuels permettant un comportement cohérent au niveau du groupe.

2.2.4 Cas des flottes d'UAVs

L'utilisation du système de drones pour différents types de missions augmente depuis quelques années et devient très populaire pour l'exploration d'un environnement [Kapoutsis 2013]. Les progrès réalisés dans la science des drones permettent d'explorer et de construire de manière autonome des représentations du monde de plus en plus complexes. Comme l'exploration d'un environnement dynamique ou statique n'est pas vraiment efficace avec un seul drone, les chercheurs gagnent à créer des architectures de plusieurs drones pour la collecte d'informations. Ce système peut être associé à un essaim ou à un système multi-robots et peut utiliser les stratégies et les méthodes de ces domaines pour amener l'équipe à coopérer ensemble afin de résoudre un objectif commun. Mais le contrôle d'une flotte de drones est plus complexe que celui d'un robot. Il faut donc d'abord connaître les approches et les algorithmes utilisés pour contrôler un UAV.

2.2.4.1 Algorithmes de guidage et de contrôle

[Kim 2006] estiment le fait que l'UAV ne peut pas supporter des capteurs très coûteux. Ils appliquent l'utilisation de capteurs peu coûteux afin de fournir un bon Guidage, une bonne Navigation et un bon Contrôle (GNC) pour un UAV autonome. Ils présentent des résultats en temps réel pour montrer l'efficacité de l'Unité de Mesure Inertielle (IMU) et du système de positionnement global (GPS) pour les questions de GNC. Ils développent trois boucles différentes qui agissent ensemble pour permettre un vol autonome du véhicule même dans des scénarios de contraintes. La boucle de navigation joue un rôle clé pour les deux autres boucles. Elle fournit la position, la vitesse et l'attitude de l'UAV de manière continue et fiable. La boucle de guidage est considérée comme une boucle de contrôle externe. Elle calcule les demandes de guidage pour forcer le véhicule à atteindre le point final souhaité, grâce aux états actuels du véhicule et au point suivant. Enfin, la boucle de contrôle de vol (ou pilote automatique) forme la boucle de contrôle interne qui génère les signaux de contrôle réels à appliquer afin de suivre les instructions de la boucle précédente. Ces travaux présentent une implémentation et des résultats en temps réel de la méthode GNC sur un drone utilisant des capteurs à faible coût.

[Goerzen 2010] passent en revue les algorithmes de planification de mouvements existants dans les domaines de la robotique, de la dynamique et du contrôle. Comme un UAV doit évoluer dans un environnement 3D dynamique, les algorithmes utilisés sont plus complexes que dans le domaine de la robotique et posent plusieurs problèmes de planification. Ce travail fournit plusieurs techniques utilisées pour guider un UAV dans un environnement complexe.

[De Marina 2017] présentent une extension d'un algorithme existant. L'aspect novateur de ce travail est le fait que l'algorithme conçu peut traiter les perturbations dues au vent lorsqu'il suit un chemin générique en 2D suffisamment lisse. La stratégie de guidage est basée sur le suivi d'un champ vectoriel généré à partir de la forme implicite de la trajectoire souhaitée. Le contrôleur de guidage est construit en deux étapes. La première consiste à construire un champ vectoriel de guidage tel qu'une

fois que l'UAV le suit, le véhicule converge vers la trajectoire souhaitée. La seconde étape consiste à diriger l'UAV afin qu'il converge vers un tel champ de vecteurs de guidage.

2.2.4.2 Planificateur de tâches et de trajectoires

Même si le contrôle de l'UAV est basé sur plusieurs algorithmes qui le guident vers une destination finale, il doit être couplé à des méthodes de planification des tâches et des trajectoires.

Les travaux de [Barbier 2004] présentent une architecture embarquée conçue pour permettre à un drone autonome d'effectuer une mission d'observation locale dans un environnement dynamique partiellement connu et peu sûr. L'architecture contient une composante de planification qui calcule la séquence optimale pour l'observation des zones de mission. Elle permet de réagir à des situations où l'exécution du plan initial n'est plus possible ; le calcul d'un nouveau plan tient compte des nouvelles contraintes.

La contribution de [Chanthery 2005] lors de son doctorat donne un aperçu de toutes les méthodes de planification d'une mission. Ses travaux sur le problème principal de la manière dont un véhicule aérien autonome peut choisir et réaliser un sous-ensemble d'objectifs pour réaliser sa mission, présentent plusieurs algorithmes de planification qui peuvent être intégrés dans une architecture réelle.

[Hattenberger 2006] développent un ensemble d'algorithmes pour une flotte de drones autonomes évoluant en étroite coordination dans un environnement contraignant. Les algorithmes permettent de déterminer les trajectoires menant à une configuration géométrique spécifique et le contrôle du vol de chaque UAV.

Le livre [LaValle 2006] présentent un grand nombre d'algorithmes de planification qui peuvent être appliqués à plusieurs domaines ainsi qu'à la robotique, à l'aérospatiale et aux drones. Ce travail est basé sur plusieurs sources, comme la robotique, la théorie du contrôle et l'intelligence artificielle, ce qui donne un livre cohérent et complet qui peut être utilisé pour bien comprendre le développement de méthodes de planification. De plus, une grande partie du livre traite des méthodes de planification dans l'incertitude, y compris la théorie de la décision qui est l'un des principaux problèmes de planification pour une flotte de drones.

Les travaux récents sur la détection et la reconnaissance de cibles multiples par les UAVs [Chanel 2013] et sur les méthodes de planification, [Chanel 2014] fournissent des techniques nouvelles pour la planification de missions robotiques. Au cours de leurs travaux, ils démontrent l'efficacité de l'utilisation de techniques modernes de planification de l'Intelligence Artificielle (IA) comme le modèle POMDP (Partially Observable Markov Decision Process). Leurs expériences en vol réel montrent que les techniques de planification POMDP sont suffisamment robustes pour atteindre des missions robotiques aériennes complexes, en supposant l'utilisation de modèles d'observation réalistes.

[Zhou 2017] décrivent en détails les aspects de la planification d'une mission par un essaim de drones. Sur la base d'une architecture distribuée, ils développent une

nouvelle méthode de contrôle et de commandement de la flotte.

2.2.4.3 A la recherche d'optimalité

Pour effectuer un vol avec une flotte de drones dans un environnement comme les nuages, il faut prendre en compte plusieurs contraintes relatives à l'environnement et au type de mission. L'une des contraintes les plus importantes est la consommation d'énergie. Pour améliorer l'information recueillie, l'échantillonnage des nuages et le temps de vol, le drone a besoin de gagner de l'énergie sur toutes les ressources fournies par son environnement. De plus, la performance du drone est directement corrélée à sa conception, donc un des objectifs sera d'optimiser la conception afin d'atteindre une mission de longue durée. Enfin, l'autre aspect à considérer est celui de la communication. L'essaim doit pouvoir communiquer ensemble autant que possible, même si l'environnement n'est pas adapté pour maintenir un lien entre chaque entité.

Augmenter l'économie d'énergie Pour appliquer la stratégie de consommation d'énergie, il faut caractériser et cartographier le vent. [Langelaan 2007] et [Chakrabarty 2010] présentent une méthodologie pour générer des trajectoires optimales qui utilisent la composante verticale du vent pour permettre des vols de longue durée et de longue distance par un drone autonome. [Cobano 2013] considèrent des missions d'exploration où les drones doivent effectuer une trajectoire par des points cibles tout en exploitant l'énergie de source thermique présente dans l'environnement, ce qui permet d'allonger la durée de vol des drones de la flotte. [Bonnin 2015] étudient la faisabilité du vol de gradient. Ils identifient les multiples contraintes liées aux caractéristiques du drone, aux conditions environnementales et aux trajectoires pour réaliser ce genre de technique de vol.

Gérer les limites de communication [Meier 2006] s'intéressent au problème de maintien de communication au sein d'une équipe de robots lors d'une mission d'exploration d'environnement inconnu. Leur résultats démontrent qu'une stratégie distribuée peut permettre aux robots d'accomplir rapidement leur mission malgré les contraintes introduites par une communication limitée.

[Brust 2015] ont travaillé sur le problème du maintien d'une connectivité et d'une communication entre un essaim de drones. Ils ont proposé un algorithme qui décrit le mouvement de l'essaim et maintient la topologie du réseau tout en utilisant uniquement des informations locales. Ils introduisent un leader dans l'essaim, qui peut être changé pendant le vol, pour obtenir et fusionner les données de tous les UAVs et ainsi prendre des décisions pour la flotte. C'est aussi le seul à avoir connaissance de sa position absolue. Leur solution ne nécessite pas de connexion avec la station au sol et est complètement distribuée.

Recherche d'optimalité [Renzaglia 2015] ont utilisé la carte construite des flux d'air locaux et des variables atmosphériques pour créer des trajectoires optimales qui

maximisent les informations recueillies. Cette optimisation se fait en deux phases. Tout d'abord, une initialisation des bonnes trajectoires est effectuée grâce à une recherche aléatoire et aveugle. Ensuite, un algorithme de montée en gradient permet d'optimiser ces trajectoires. Pour la seconde phase, les auteurs proposent d'utiliser une version contrainte de l'algorithme d'approximation stochastique de la perturbation simultanée. Ils utilisent également la carte d'utilité locale et les meilleures trajectoires dans la configuration initiale pour la phase de montée du gradient.

[Silva 2015] ont mis en œuvre une couche d'optimisation des trajectoires au sein d'un système d'application dynamique, aéroporté, conscient de l'énergie et guidé par les données pour une surveillance permanente des drones. Ils ont combiné l'estimation des données du champ de vent, l'optimisation des trajectoires et les protocoles de communication pour utiliser cette couche. L'aspect novateur de ce travail est l'algorithme d'optimisation de trajectoire évolutives qui génère des trajectoires de vol dynamiques. Des arbres de mission de guidage et d'orientation sont utilisés, ainsi que des fonctions et des contraintes de coût afin d'obtenir la meilleure solution pour la couche d'optimisation.

[Nguyen 2016] traitent du problème de "informative soaring" (IFS) qui consiste à effectuer une mission de collecte d'informations tout en reconstituant simultanément l'énergie à partir de sources d'énergie thermique. Leur but est donc de trouver un chemin qui maximise les informations recueillies tout en tenant compte des contraintes énergétiques. Ils ont combiné l'optimisation convexe avec la recherche par graphiques et ont comparé quatre trajectoires différentes. D'après leurs résultats, ils ont estimé que la meilleure solution au problème de l'IFS est la recherche d'arbres à grappes.

[Bouhoubeiny 2016] présentent un outil pour optimiser la conception des drones à longue endurance. Ils ont démontré la différence de conception des drones en fonction de leur profil de mission. Ils ont créé un modèle d'optimisation qui met en œuvre plusieurs blocs disciplinaires représentatifs du système et qui sont ensuite reliés entre eux par des paramètres communs. Plusieurs processus d'optimisation communs ont été comparés afin de résoudre un problème d'optimisation. Afin de maximiser l'endurance en fonction des différents profils de mission, ils ont formulé un problème d'optimisation et l'ont résolu en exploitant le modèle d'optimisation créé. En comparant la précision et le temps de calcul de chaque processus d'optimisation, ils ont prouvé que les méthodes de recherches locales, avec un démarrage multiple, sont les meilleurs processus pour trouver la solution optimale (par rapport à la recherche globale).

2.3 Architecture

2.3.1 Définition

La première notion qui vient en tête quand l'on parle d'architecture est naturellement la structure d'un édifice. Une définition courante que l'on peut trouver dans le dictionnaire Larousse est : "*L'art de construire les bâtiments ou ce qui constitue l'os-*

sature, les éléments essentiels d'une œuvre". Cependant il existe aussi une définition plus spécifique aux architectures logicielles et matérielle : "*Organisation des divers éléments constitutifs d'un système informatique, en vue d'optimiser la conception de l'ensemble pour un usage déterminé.*"

Dès lors, on peut voir que la définition d'une architecture est assez vague et touche de nombreux domaines et applications. Pour donner une définition assez générale, on pourrait dire qu'une architecture représente la façon dont sont organisés les divers éléments qui composent une structure répondant à une fonction bien précise. Cette architecture, permet entre autres de définir des règles pour concevoir les éléments qui la composent mais également d'organiser les interactions entre les éléments.

Dans le cas de cette thèse, la définition la plus correcte serait la définition d'une architecture logicielle ou d'un système au sens large. Dès lors, il existe dans la littérature des ouvrages [Bass 2003] et des thèses [Fielding 2000] qui donnent des définitions précises de toutes les notions qui accompagnent les architectures logicielles. Ces deux auteurs s'accordent à dire qu'une architecture logicielle d'un système correspond à la façon dont les éléments de ce système sont structurés et comment ils sont censés interagir entre eux. De ce fait, une architecture est alors définie par la configuration d'éléments architecturaux tels que les composants, les connecteurs ou alors les données échangées, sachant que ces éléments seront limités dans leurs relations afin d'obtenir un ensemble de propriétés architecturales désirées.

On peut voir que la création d'une architecture logicielle peut impacter aussi bien la façon dont le système sera structuré que la façon dont les échanges vont se dérouler. Pour un système de drones, un système robotique ou même un système multi-agents, la conception d'une architecture impacterait les deux domaines principaux qui sont les communications, donc la conception du réseau, et la façon dont chaque composant agit.

2.3.2 Notion de distribution

L'informatique distribuée est devenue une branche à part entière de l'informatique à la fin des années 70 et au début des années 80. À ce moment, une définition primaire de ce qu'est un système distribué a été donnée :

Un système distribué peut être considéré comme un système dans lequel des entités, qui ne partagent pas le même espace physique et/ou une référence temporelle commune, doivent travailler en coopération afin de résoudre un problème. [Lann 1977]

Les définitions des termes les plus couramment acceptées sont les suivantes :

- Un système **centralisé** est basé sur un nœud central qui traite les données recueillies par les autres nœuds et prend une décision.
- Un système **distribué** est un système dans lequel le calcul est réparti de façon hiérarchique entre les composants, qui communiquent et coordonnent leurs actions en faisant remonter des messages.

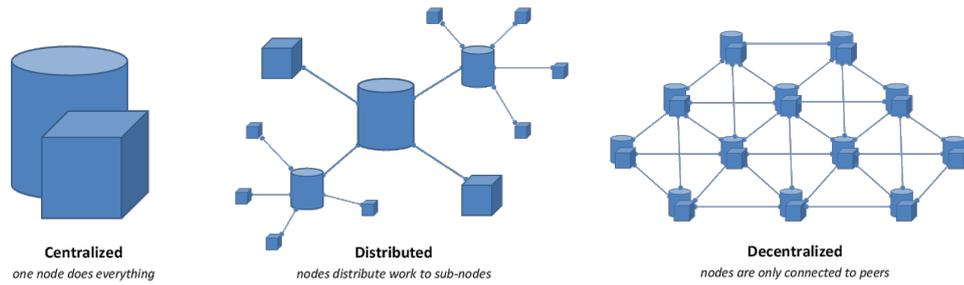


FIGURE 2.4 – Les différents systèmes topologiques : (a) centralisé, (b) distribué, (c) décentralisé

- Un système **décentralisé** est un système dans lequel les composants opèrent sur des informations locales pour atteindre des objectifs, plutôt que le résultat d'une influence d'ordre central.

Selon les définitions précédentes, un système distribué signifie que le traitement est partagé entre plusieurs nœuds, mais que les décisions peuvent être (ou non) centralisées et que chaque nœud du système peut utiliser la connaissance complète du système (Figure 2.4 (b)).

Pour un système décentralisé, un point clé est qu'il n'y a pas qu'un seul point où la décision est prise. Chaque nœud prend une décision pour son propre comportement et le comportement du système qui en résulte est la réponse agrégée. Une autre caractéristique de ces architectures est qu'aucun nœud ne dispose d'une information complète sur le système (Figure 2.4 (c)).

Ce qui est assez intéressant, c'est que cette définition a évolué depuis un certain nombre d'années, notamment avec l'arrivée d'internet et de la construction d'architectures réseaux de plus en plus complexes. Dès lors, il semblerait que ce que l'on appelait décentralisé s'est transformé en distribué et inversement [Riccio 2015, Ghidoni 2014]. Aujourd'hui, s'il fallait définir clairement ces termes pour un système, on pourrait dire qu'une architecture distribuée est une architecture dans laquelle chaque nœud est relié à un ou plusieurs autres nœuds, et plus généralement (mais pas nécessairement) aux nœuds qui composent son voisinage. Dans une telle architecture, il n'existe pas de nœuds plus importants que d'autres, chacun jouant un rôle dans le système et leurs fonctions pouvant être aussi bien hétérogènes qu'homogènes. De l'autre côté, une architecture décentralisée représente une structure dans laquelle des groupes de nœuds se forment. Ainsi tous les nœuds sont au moins rattachés à un autre mais certains nœuds auront un rôle de chef de groupe et seront du coup reliés à un grand nombre d'autres nœuds. On peut voir une architecture décentralisée comme une composition de plusieurs architectures centralisées.

L'un de sujet que je trouve fascinant concernant les architectures distribuées est que l'on peut les retrouver dans l'interaction entre les animaux d'un même groupe. Dans la nature, ces derniers se déplacent dans leur environnement de façon coordonnée en utilisant seulement des informations locales visuelles et auditives. Comment

un membre d'une harde de chevaux arrive à se déplacer aussi vite tout en évitant les collisions ? Quelles interactions entre les oiseaux d'un murmure d'étourneau leur permettent-ils d'effectuer une telle danse aérienne ? Quelle stratégie permet à un poisson coincé au milieu de son banc d'éviter un prédateur en se basant seulement sur les mouvements de ces voisins ? Tous ces groupes d'animaux peuvent être considérés comme des architectures distribuées. Les membres de ces groupes sont chacun dotés d'une intelligence personnelle. Leur observations de l'environnement qui les entoure et les interactions qu'ils pourront avoir avec le reste du groupe vont conduire à la prise d'une décision et à une action. Ainsi, à travers une multitude d'interactions et d'actions personnelles, chaque membre aura participé à l'intelligence collective du groupe. On pourrait également prendre comme exemple les fourmilières qui représentent assez bien les architectures décentralisées. Là où les exemples précédents concernaient des groupes d'animaux homogènes, ils avaient tous le même rôle à jouer dans le groupe, une fourmilière est plus hétérogène. Toutes les fourmis ont un rôle bien particulier à jouer dans le groupe et l'interaction entre chaque membre est limitée. Pour organiser la colonie et bien se répartir les tâches, des petits groupes avec des responsables se forment et une hiérarchie est mise en place.

La modélisation des interactions présentes au sein d'un groupe d'animaux dans la nature est un axe de recherche à part entière, appelé bio-mimétisme. Des publications comme celle de [Sumpter 2010] permettent d'avoir une vue globale de comment et pourquoi les comportements d'essaims et de groupes se produisent dans la nature. Cette étude se concentre sur la façon dont les animaux se déplacent ensemble, comment ils transfèrent de l'information, comment ils prennent une décision et synchronisent leurs actions, et finalement comment ils construisent l'architecture du groupe. Cette publication propose notamment une synthèse de plusieurs modèles mathématiques qui peuvent être applicables pour construire de tels comportements. Ces récentes découvertes et l'amélioration en termes de puissance de calcul durant ces dernières années permettent maintenant de modéliser des systèmes de plus en plus complexes comme par exemple un banc de poissons [Calovi 2014].

Dans la robotique, de nombreux projets se servent désormais de ces modèles pour construire et organiser une équipe de robots. Certains s'inspirent tout simplement des méthodes de déplacements coordonnés des animaux pour concevoir un réseau de robots mobiles [Martinez 2007]. D'autres se servent d'une architecture distribuée pour mettre en place un système multi-robots capables de se répartir une charge de calcul importante [Weitzenfeld 2003]. On peut également retrouver beaucoup d'articles liés à la robotique qui impliquent la notion d'essaim. [Brambilla 2013] décrivent d'ailleurs cette branche de "la robotique en essaim" comme une "approche de la robotique collective qui s'inspire des comportements auto-organisés des animaux". Dans cette revue, ils se focalisent notamment sur la définition de plusieurs concepts et idées importantes qui peuvent être utiles en terme d'ingénierie dans la conception d'un vrai essaim de robots.

Pour les drones, l'utilisation des architectures distribuées est aussi un réel enjeu. Les travaux de [Doherty 2004] sont un exemple parfait de l'utilisation d'une architecture distribuée pour réaliser un système de drones robuste et évolutif afin de réaliser

des missions classiques. Ces recherches datant de quelques années maintenant et l'utilisation de ces méthodes de conception d'architecture n'ont cessé d'évoluer.

2.3.3 Implication pour une flotte de drones

La section précédente a permis de donner une définition assez précise des architectures distribuées. Ce qui est intéressant c'est que ce concept s'applique à un large ensemble d'application. Par exemple, [Riccio 2015] donnent la même définition pour un système multi-robots. Selon leur travail, dans une architecture décentralisée, chaque robot dispose d'une représentation complète et redondante de son environnement, grâce à des messages diffusés. Pour un système distribué, ils considèrent que chaque robot prend sa propre décision en fonction de sa représentation partielle de son environnement, qui sera mise à jour avec les informations obtenues de ses coéquipiers. Ces aspects distribué, décentralisé et centralisé se retrouvent aussi bien dans la littérature des systèmes multi-robots, que dans celles de l'IA, des drones et également des systèmes multi-agents.

La conception d'une architecture distribuée pour un système de flotte de drones se divisera en deux principales tâches. Tout d'abord, la conception du système de communication qui permettra entre autres aux drones de se partager les informations locales dont chacun dispose. Et en second, la répartition des différentes fonctionnalités dans le système.

2.3.3.1 Organiser les communications

La communication est l'une des clés qui peut permettre à une flotte de drones d'être considérée comme distribuée. La construction d'un réseau est une branche de recherche à part entière et on peut retrouver les mêmes notions. Le premier à introduire une véritable définition de la structure décentralisée et distribuée a été [Baran 1964]. À cette époque, la science des réseaux était assez nouvelle et la définition de l'architecture du réseau n'était pas fixe. Aujourd'hui, elle ne s'appelle plus "architecture de réseau", mais "topologie de réseau". Selon les différentes littératures, on différencie les topologies "physiques" et "logiques" d'un réseau.

Selon la définition primaire donnée par [Baran 1964], les architectures de réseaux peuvent être classées en trois classes : centralisées, décentralisées et distribuées.

Comme le montre la figure 2.5, un réseau **centralisé** est défini comme une structure en étoile (Figure 2.5 (a)). Chaque nœud de l'architecture est relié à un nœud central. Ces architectures sont les plus vulnérables : si le nœud central est retiré, tout le réseau tombe.

Un réseau **décentralisé** peut être considéré comme une combinaison de plusieurs sous-réseaux centralisés pour former un réseau global (Figure 2.5 (b)). L'essentiel est que chaque sous-réseau soit relié à au moins un autre sous-réseau. Ainsi, un réseau décentralisé est plus robuste et plus tolérant qu'un réseau centralisé, car pour fermer tout le réseau il faut enlever plusieurs nœuds. Néanmoins, la perte de certains nœuds peut conduire à isoler les sous-réseaux.

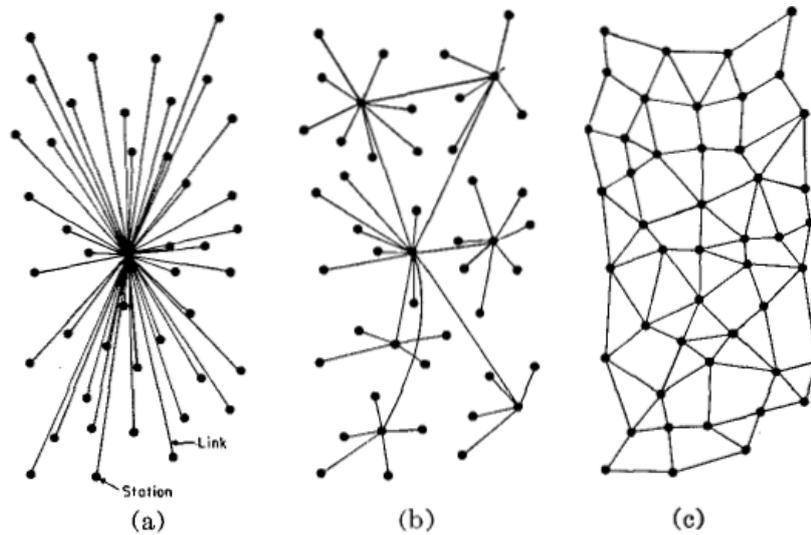


FIGURE 2.5 – Types de réseaux selon la définition de [Baran 1964] (a) centralisé, (b) décentralisé, (c) distribué

Un réseau **distribué** n'établit pas seulement des connexions entre les sous-réseaux, mais a de multiples connexions avec les nœuds environnants (Figure 2.5 (c)). Ce qui signifie que dans ces architectures, tous les nœuds doivent avoir la possibilité de faire suivre les communications des autres nœuds.

La topologie physique d'un réseau peut être considérée comme la façon dont les différents nœuds sont physiquement reliés entre eux, par des câbles ou des connexions sans fil. Aujourd'hui, avec l'explosion de la science des réseaux, plusieurs topologies existent, mais cette section ne définit que les architectures qui correspondent à une architecture centralisée, décentralisée ou distribuée.

[Tsaio 1984] ont rédigé un aperçu des différentes topologies de réseaux locaux (LAN). Il a défini les topologies les plus courantes comme suit :

- L'étoile : une connexion point à point multiple qui transporte des données depuis et vers un hub central. C'est l'architecture centralisée la plus représentative d'un réseau.
- L'arbre hiérarchique ou l'étoile étendue : une combinaison de topologies en bus et en étoile avec une structure hiérarchique. C'est l'architecture décentralisée la plus représentative.

Ces topologies de base sont toujours utilisées dans le réseau mais des topologies plus complexes sont apparues. [Santra 2013] et [Ciubotaru 2013] donnent un aperçu des différentes topologies actuelles, et les définissent ainsi :

- Le point à point : une connexion directe entre deux appareils ou nœuds.
- Le maillage : une topologie de réseau à maillage complet, représente un réseau où chaque nœud est directement connecté à tous les autres ou seulement une partie des nœuds de ce réseau.
- Topologie ad-hoc : Cette topologie est utilisée pour les réseaux sans fil et

représente une structure dynamique où chaque nœud établit dynamiquement un lien de communication avec les nœuds de son voisinage. Ainsi, chaque nœud agit en tant que routeur et hôte dans ce réseau.

Les deux dernières topologies définies représentent l'architecture la plus distribuée, une statique (mesh) et une dynamique (ad-hoc). Les définitions précédentes peuvent être trouvées sur les cours de réseau [NET 2005] et sur la plupart des sites web parlant d'architectures de réseaux^{3 4}.

[Berkes 2003] ont analysé deux réseaux décentralisés de partage de fichiers différents qui permettent une participation libre à l'échelle d'Internet. Ils ont décrit un réseau décentralisé où aucune autorité centrale n'est en place. Ce qui signifie qu'il peut fonctionner avec des nœuds totalement indépendants. Le premier système de partage de fichiers décentralisé apparaît vers les années 2000 avec *Freenet* et *Gnutella*. Pour ces deux systèmes, un hôte individuel (ou un nœud) peut se connecter à plusieurs nœuds afin d'atteindre le reste du réseau.

[Vey 2014] proposent d'introduire le réseau ad-hoc aéronautique (AANET) pour compléter les communications existantes dans l'aviation civile. Ils démontrent l'efficacité de cette connexion sur des simulations.

[Bouachir 2014] visent à mettre en place un réseau ad-hoc sur un essaim de drones, qui doivent communiquer ensemble afin de créer une vision claire de la situation de l'essaim. La mobilité des nœuds a un effet direct sur la topologie du réseau et les performances du protocole de communication et l'utilisation d'un modèle de mobilité réaliste est essentielle. Ils développent ce modèle, appelé *PPRZM*, en se basant sur les mouvements d'un drone équipé du système *Paparazzi*⁵. Les résultats de la simulation montrent que le *PPRZM* peut être utilisé pour évaluer n'importe quel protocole de communication dans le contexte d'un essaim de drones collaboratifs.

Dans un travail récent, [Maxa 2017b] (et [Maxa 2017a]) démontrent l'utilité du réseau ad-hoc pour la communication dans un essaim de drones. Cette étude et sa thèse sur le réseau ad-hoc de drones (UAANET) apportent plusieurs solutions aux problèmes de protocole de routage et à la création d'une architecture sécurisée pour une flotte.

[Yanmaz 2014] présentent un résultat de performance expérimental sur la communication d'une équipe multi-rotors. Ils comparent la capacité de communication pour trois architectures différentes : la communication à un ou deux bonds avec un drone en mode point d'accès et un réseau maillé avec les drones. Les résultats montrent qu'une communication maillée permet une meilleure communication sur une longue distance.

[Barritt 2017] utilisent un réseau maillé sans fil à bonds multiples basé sur des paquets pour leur réseau de liaison avec plusieurs UAVs. Ils ont comparé différents protocoles de routage par simulation et ont décrit plusieurs défis posés par un réseau avec des nœuds transportés par des drones.

3. <http://www.certiology.com/computing/computer-networking/network-topology.html>

4. <https://spectrum.ieee.org/telecom/internet/the-lure-of-a-fully-decentralized-internet>

5. <http://paparazziuav.org>

Ces travaux montrent que beaucoup de recherches sont encore menées actuellement sur le développement de méthodes de communication et de construction de nouvelles architectures de réseaux efficaces pour permettre un déploiement de drones à large échelle. Par ailleurs, certains travaux se focalisent également sur la sécurité réseaux. Avec leur utilisation de plus en plus importante dans notre société, garantir que les drones ne puissent pas être attaqués et contrôlés par un hacker est un sujet très important qui permettra notamment de certifier l'application des drones en zones urbaines et habitées. Maintenant que les différentes architectures réseaux distribuées ou décentralisées ont été présentées, la section suivante est dédiée au système en lui-même et l'implication de la notion de "distribué" sur un système robotique complet.

2.3.3.2 Répartir les fonctions

Dans les sections précédentes, une définition des architectures distribuées a été apportée. Ce genre d'architecture impactant la conception du système et celle du réseau de communication, des exemples d'architectures réseaux distribuées ont été exposés à travers différents articles de la littérature. Maintenant, la question qui se pose est quel sera l'impact d'une telle architecture sur la répartition des principales fonctions du système.

Perception La notion de perception distribuée reviendrait à concevoir l'architecture d'un système de façon à ce que l'agrégation des observations locales de chaque agent serve à construire la perception globale de l'environnement qui les entoure.

[Bryson 2007] ont par exemple développé une méthode pour créer une architecture distribuée applicable pour l'exploration d'environnements inconnus. En effet, une partie du processus SLAM est réalisé sur chaque UAV. Ainsi, chaque UAV maintient sa propre carte locale et sa localisation estimée puis envoie les données relatives à sa carte à un nœud central qui filtrera ces données provenant de chaque UAV et calculera une carte centrale. Cette solution est donc une architecture décentralisée pour les multi-véhicules qui veulent utiliser une méthode SLAM. Les résultats ont montré que cette architecture créée pour réaliser un SLAM multi-UAVs et un contrôle coopératif est assez efficace et maximise le contenu des informations de la carte partagée. La décentralisation de l'algorithme SLAM et du processus de planification réduit la charge de calcul et la largeur de bande de communication. Mais cette solution repose toujours sur un nœud central.

[Ghidoni 2014] ont travaillé sur le développement d'un système intelligent pour l'assistance à l'autonomie. Pour extraire des informations de haut niveau sur l'environnement, ils développent différents nœuds de traitement et utilisent plusieurs capteurs pour acquérir des données audio et vidéo. Ces capteurs sont très hétérogènes afin de collecter une grande quantité de données. Ils parviennent à développer une nouvelle infrastructure de perception distribuée.

Cet article de [Saldana 2017] a été d'une grande source d'inspiration pour les travaux présentés plus tard et il permet de bien comprendre cette notion de perception

distribuée. Cet article présente une nouvelle méthode pour estimer la frontière d'un phénomène dynamique dans un environnement inconnu avec une équipe de robots. Ils prouvent notamment qu'avec un essaim, il est possible de collecter des données localement, de les communiquer et d'effectuer les calculs nécessaires pour estimer la bordure de ce phénomène. La partie intéressante de leur travail est qu'ils réussissent à distribuer le traitement sur la totalité de l'équipe. Chaque agent, doté d'une intelligence limitée, se sert des informations recueillies par l'ensemble de l'équipe pour construire une image du phénomène et déterminer ses actions à mener afin d'atteindre un but global : modéliser la bordure.

Décision Le problème de prise de décision distribuée est un problème très connu dans différents domaines. L'ensemble de ces recherches apportent des solutions plus ou moins différentes autour de la problématique qui est : comment prendre une décision commune dans un groupe composé de plusieurs agents intelligents ? Cette section a pour but d'apporter des exemples d'architectures et d'algorithmes permettant d'arriver à une décision commune au sein d'un groupe d'agent.

[Smith 1980] présentent le développement d'un algorithme de décision distribué nommé Contract Net Protocol (CNP). Ce protocole est défini par un ensemble de messages qui permettent de prendre une décision collective vis à vis d'une nouvelle tâche à réaliser. Le principe est que lorsqu'une nouvelle tâche est donnée à l'ensemble du groupe, un superviseur de la tâche sera désigné. Il sera responsable de l'attribution et de l'exécution de cette tâche à un autre agent. Ce superviseur va donc envoyer un message à tous le groupe composé des informations nécessaires pour effectuer la tâche. Ensuite chaque membre du groupe qui aura reçu ce premier message répondra en fournissant au superviseur une évaluation du coût qui serait associée à cette tâche. Ce coût peut être calculé par rapport à une distance d'un point à atteindre ou à une quantité d'informations à collecter par exemple. La politique d'évaluation du coût est laissée libre selon le domaine d'application de ce protocole. Finalement, une fois un certain temps écoulé, le superviseur classe les messages reçus des autres agents et détermine lequel sera amené à remplir cette tâche. Ce protocole est notamment composé de diverses méthodes pour éviter de rester bloquer dans certains états comme par exemple lorsqu'un agent ne peut communiquer avec le reste du groupe ou encore lorsqu'une tâche nécessite d'en réaliser une autre en même temps.

Au fil des années le CNP a évolué et a commencé à être appliqué à de plus en plus de systèmes différents. [Botelho 1999] présentent dans cet article une architecture distribuée de coopération multi-robots. Plusieurs algorithmes sont présentés pour la planification de missions, de création de tâches et des mécanismes de coopération parfaitement adaptables au CNP. De la sorte, ils placent ce protocole comme un élément à part entière dans un système de contrôle multi-robots et discutent de son rôle au sein de cette architecture. [Gerkey 2002] définissent la coopération comme étant la clé pour une bonne réussite dans un système multi-robots. Ils se focalisent donc sur la conception d'une nouvelle méthode de répartition de tâches pour un groupe de robots qui peut être amené à évoluer dans des environnements bruyants

et dynamiques. Ce système de répartition de tâches basé sur des enchères, appelé MURDOCH, est une variante du CNP. Ils ont notamment validé leur travaux à travers différentes simulations et expérimentations réelles utilisant un groupe de robots. Cet article apporte une preuve empirique que les mécanismes de négociation distribuée sont viables et efficaces pour créer des systèmes multi-robots capables de travailler collectivement. [Lemaire 2004] ont travaillé sur la construction d'une architecture distribuée pour la répartition des tâches dans un système multi-UAVs. Ils ont réussi à répartir la décision sur l'ensemble des drones grâce au CNP, au développement d'un *Coefficient d'équité* et à un contrôle de la génération des enchères par une stratégie d'un jeton en anneau. En répartissant la création des enchères avec cette méthode de jeton, cela permet d'attribuer le rôle de superviseur à n'importe quel drone de la flotte.

La communauté de recherche s'est beaucoup intéressée pendant ces dernières années aux différentes approches de prise de décision et de coordination multi-robots basée sur des enchères. Ces méthodes ont été déployées dans de nombreux domaines et pour des missions variées comme par exemple la cartographie et l'exploration d'un environnement inconnu ou encore la coordination d'une équipe pour réaliser des tâches complexes. [Dias 2006] proposent un état de l'art des différents articles dans ce domaine. Ce document fournit un examen et une analyse de toutes ces méthodes tout en ouvrant la discussion sur les défis restant à accomplir dans ce domaine. [Lacroix 2007] décrivent une architecture complète permettant des opérations coopératives d'une flotte de drones. Le système développé est composé d'un algorithme CNP, un schéma de planification de tâches et d'un système de coordination et d'exécution. Ces travaux ont été une source majeure de réflexion sur la conception de l'architecture pour cette thèse. [Capitan 2014] proposent un document récapitulatif des principales contributions réalisées dans ce domaine. Ils réussissent notamment à développer une nouvelle vente aux enchères décentralisée, où au lieu de tâches, ce sont des comportements qui sont distribués ; les robots peuvent passer d'un comportement à l'autre de façon dynamique à chaque étape de décision. L'enchère détermine en permanence quel est le meilleur comportement pour chaque robot afin d'atteindre l'objectif en coopération. [Ahmed 2016] donnent un aperçu des différentes stratégies de contrôle et d'estimation distribués (DCE) pour assurer la coordination et la coopération d'un réseau multi-véhicules autonome. Ils sélectionnent plusieurs articles relatifs à la prise de décision distribuée, la perception, la planification, le contrôle, le partage d'informations, ... Cette étude des progrès récents du DCE apporte une perspective différente des communautés du contrôle et de la robotique pour créer un système distribué avec plusieurs entités. [Othmani-guibourg 2017] ont étudié la différence entre différents comportements d'agents pour résoudre un problème de patrouille multi-agents sur un environnement dynamique. D'une part, ils ont créé un système décentralisé avec plusieurs agents "réactifs" qui prennent leurs propres décisions en fonction du calcul de leur propre carte locale en temps réel. D'autre part, ils ont introduit un système centralisé avec plusieurs agents et un coordinateur qui calcule toutes les cartes locales rassemblées par chaque agent et choisit le prochain point à atteindre. A travers différentes simulations, ils concluent sur le fait que

le système centralisé semble plus efficace pour explorer l'environnement dynamique. Cependant, il ajoutent que cette méthode consistant à utiliser un coordinateur pour prendre les décisions est très coûteuse en communication et en puissance de calcul pour le nœud central.

2.4 Synthèse de l'état de l'art

Pour mieux comprendre la question de recherche de la thèse cette section propose un résumé des notions importantes de cet état de l'art. Du point de vue des méthodes d'exploration d'un environnement dynamique, nous pouvons retenir qu'il est nécessaire de réaliser des trajectoires réactives et adaptables aux conditions variables de l'environnement. Ces travaux montrent également l'importance dans le choix de la méthode de partage des tâches (collaborative/coopérative) pour un système multi-agents. De plus, ils nous donnent un aperçu des différentes méthodes de guidage, contrôle et planification de trajectoires pour un ou plusieurs drones. Ils détaillent notamment certaines approches basées sur l'utilisation d'un critère d'optimal pour mener à bien une mission. La seconde partie de l'état de l'art, en nous détaillant les différents types d'architectures (centralisées, décentralisées, distribuées) nous guide vers le choix des architectures distribuées qui permettraient de répartir équitablement la charge de calcul globale entre les agents et ainsi rendre le système plus autonome et robuste. Enfin ce chapitre liste les différentes méthodes de communication, perception et décision permettant la mise en place de ce genre d'architecture avec une flotte de drones.

Architecture développée

Contents

3.1	Méthodologie	35
3.2	Contraintes associées aux missions d’exploration d’environnements dynamiques	37
3.2.1	L’utilisation de drones spécifiques pour explorer des nuages	37
3.2.2	Pallier les contraintes de communication dans de telles missions	41
3.3	Modélisation des nuages	41
3.4	Architecture du système	43
3.4.1	Architecture idéale	43
3.4.2	Architecture effectivement déployée	46

Ce chapitre présente l’architecture développée pour permettre à une flotte de drones d’explorer un environnement dynamique. Tout d’abord il présente la méthodologie mise en place tout au long du projet pour réfléchir aux problématiques, définir des approches et valider les nouvelles implémentations. Ensuite il donne des détails sur les différentes contraintes liées à l’exploration d’un environnement aussi dynamique qu’un nuage. Il présente notamment l’approche utilisée pour permettre la modélisation de ce dernier. Par la suite, il propose un aperçu des multiples fonctionnalités nécessaires au système pour parvenir à accomplir une mission d’exploration d’environnements dynamiques tout en respectant une approche d’architecture distribuée. Enfin, il résume l’approche choisie pour le projet **NEPHELAE** et expose en détails l’architecture réellement déployée.

3.1 Méthodologie

L’objectif de cette section est de détailler les différents points importants de la méthode de développement de l’architecture logicielle permettant de réaliser des missions d’exploration d’environnements dynamiques avec une flotte de drones. Il faut savoir que ce travail est principalement basé sur l’objectif d’explorer un nuage, cependant l’architecture décrite pourrait servir à toute autre application mettant en œuvre des drones dont l’objectif serait de collecter des données dans un environnement dynamique et inconnu. De plus l’ensemble de l’architecture a été pensée de façon distribuée, de sorte que les développements futurs d’algorithmes et de protocoles distribués soit intégrables facilement à l’ensemble du système.

D'un point de vue de l'architecture du système, la méthode a été de se servir de la suite logicielle PPRZ et d'ajouter des modules supplémentaires ayant des fonctionnalités plus spécifiques. En effet, PPRZ propose déjà un grand nombre d'outils qui permettent d'échanger des messages entre les différentes composantes de ce système. En se servant de ces messages et en développant des logiciels pouvant s'interfacer avec l'autopilote, il est possible d'interagir directement avec les drones. C'est sur ce principe que le logiciel de cartographie qui est utilisé pour créer une carte des nuages a été implémenté. Ce dernier, situé au sol, a été développé par les membres du LAAS qui ont utilisé leur savoir sur les méthodes de cartographie et le développement d'architectures dédiées à la robotique pour implémenter un module de cartographie complémentaire à PPRZ. En plus d'apporter des solutions de cartographie, ce logiciel présente différentes interfaces montrant les données en temps réel ou la carte construite. Le développement de ces interfaces a été le résultat de plusieurs réunions de réflexion pour définir les fonctionnalités nécessaires à ce module.

Au niveau des trajectoires à mettre en place pour échantillonner un nuage, la méthode a été d'utiliser l'ensemble des connaissances des scientifiques de l'atmosphère pour comprendre au mieux leur besoin en termes de collecte de données. De leur côté, ils souhaitent avoir un échantillonnage spatial et temporel complet pour reconstruire précisément les phénomènes d'évolution des nuages. Il faudrait pour cela déployer plusieurs centaines de drones pour obtenir un maillage spatial de capteurs suffisamment fin, ce qui n'est pas réaliste. L'idée a donc été de trouver un compromis entre les besoins des météorologues et les capacités actuelles des drones du système PPRZ. Tout d'abord, la zone d'exploration a été restreinte de façon à convenir au nombre maximum de drones possibles à déployer. De plus, en explorant des zones bien précises, il est possible de reconstruire un modèle d'évolution du phénomène. En effet, les propriétés macroscopiques d'un nuage sont directement liées à son évolution : ainsi certains paramètres tels que le diamètre de la base du nuage, les vents ascendants ou encore la hauteur du nuage peuvent fournir une idée sur son évolution. Différentes zones d'intérêt ont donc été définies. Ensuite, le principe était de proposer différents schémas de vol sur chaque zone pour collecter des mesures selon des stratégies différentes. C'est en se basant sur les schémas de vol classiques que des fonctions de navigation plus complexes capables de s'adapter aux changements dynamiques du nuage ont été développées.

Une fois les nouvelles fonctions de navigations créées, il était nécessaire de définir une stratégie d'évaluation des motifs de vol pour valider leur utilité en comparaison avec les schémas de vol classiques. La définition d'une méthode pouvant permettre de valider l'efficacité des schémas de vol adaptatifs a été un problème durant toute la durée de la thèse. En effet la question du choix du critère d'évaluation et de métriques pour valider les schémas de vol adaptatifs était très complexe. Trouver une métrique pertinente n'a pas été possible : le temps passé dans le nuage ou la couverture spatiale engendrée par une trajectoire qui sont des métriques classiques n'intéressaient pas les météorologues. La seule métrique qui semblait adéquate provenait de l'analyse des données collectées, après un vol, par les scientifiques de l'atmosphère. Ainsi, leur expertise des résultats que ce soit en simulation ou lors de vrais vols, permet

de mieux comprendre leur besoins en termes de mesures pour réaliser un meilleur modèle d'évolution du phénomène.

3.2 Contraintes associées aux missions d'exploration d'environnements dynamiques

Cette section a pour but d'expliquer plus en détails les différentes contraintes liées au développement d'une flotte de drones pour accomplir ce genre de mission d'exploration. Dans un premier temps, elle présente différents types de drones qui étaient envisageables pour le projet, en mentionnant les contraintes et avantages de chaque type. Les caractéristiques de vol au sein d'un nuage sont présentées ainsi qu'un cahier des charges à respecter pour concevoir un drone spécifiquement dédié à l'exploration de ce type d'environnement. Cette première partie se termine sur la présentation du travail d'un post-doctorant dans le cadre du projet [NEPHELAE](#) qui a développé un drone en fonction de ce cahier des charges. Pour finir, la section expose les contraintes associées aux communications qu'il faut mettre en place au sein de la flotte. Elle se termine par la présentation d'une solution intégrant différents réseaux et modems de communications.

3.2.1 L'utilisation de drones spécifiques pour explorer des nuages

Les caractéristiques les plus importantes pour définir les capacités d'un drone sont les suivantes :

- l'envergure correspond à la distance maximale séparant les deux extrémités des ailes ;
- la longueur du fuselage représente la taille du corps du drone ;
- la masse à vide et la masse maximale au décollage déterminent la charge utile qu'il peut emporter ;
- l'autonomie définit la durée pendant laquelle l'UAV peut voler ;
- la vitesse minimale, aussi appelée vitesse de décrochage, est la vitesse la plus basse à laquelle le drone peut voler ;
- la vitesse maximale définit la vitesse la plus élevée avant de dépasser les limites physiques du drone (structure, moteur, capteur ...) ;
- la vitesse de croisière correspond à la vitesse de vol la plus adaptée pour le drone, compromis entre la consommation et la réalisation de la mission ;
- la méthode de décollage et d'atterrissage doit être adaptée à la masse de l'avion, sa vitesse de décrochage, sa résistance structurelle et aux contraintes du terrain.

***Observation:** Certains paramètres de base sont directement donnés par la conception de l'UAV. C'est le cas de la vitesse de croisière et de l'angle de roulis maximum. A l'aide de ces informations basiques, il est possible de calculer d'autres*

caractéristiques avec de simples formules telles que le rayon de virage, la vitesse de montée, . . . Le rayon de courbure minimum peut être par exemple calculé avec l'équation suivante :

$$R_{min} = \frac{V^2}{g \tan(roll_{max})} + R_{margin} \quad (3.1)$$

où R_{min} correspond au rayon de courbure minimum, V à la vitesse de croisière, g à la constante de gravitation, $roll_{max}$ à l'angle de roulis maximum et R_{margin} une marge pour garantir l'exécution de la courbe même dans des conditions difficiles.

De très nombreux modèles de mini et micro-drones de type avions utilisés pour la recherche scientifique sont des appareils d'aéromodélisme modifiés et adaptés pour y installer des instruments. Il existe également des modèles dédiés conçus sur le même principe avec une structure en mousse. Les engins à voilure tournante les plus fréquents sont de type multi-rotors car de conception plus simple et plus robuste que les modèles hélicoptères. Enfin, de plus en plus de recherches et développements vont vers les structures hybrides de façon à tirer le meilleur parti des deux mondes [Smeur 2019, Olszanecki Barth 2020].

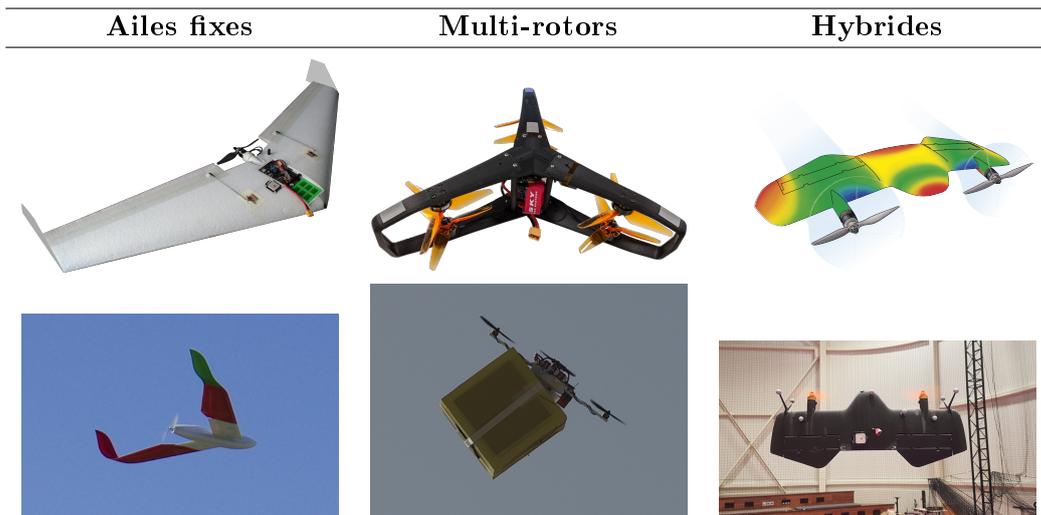


FIGURE 3.1 – Plusieurs images de drones aux structures différentes développés par l'ENAC

Le tableau 5.3 présente succinctement des avantages et inconvénients de chaque type de drone ainsi que les missions sur lesquelles ils sont le plus adaptés.

Dans le cas d'exploration d'environnements fortement dynamiques tels que les nuages, le choix de la structure se porte plutôt sur une aile fixe ou une configuration hybride que sur un multi-rotors. La technologie autour des configurations hybrides n'étant pas encore totalement maîtrisée, nous avons fait le choix de partir sur des ailes fixes.

Les scientifiques de l'atmosphère, grâce à leurs connaissances sur l'évolution de ce phénomène et l'environnement qui l'entoure ainsi qu'aux retours d'expériences qu'ils ont pu avoir sur des missions similaires, ont défini un cahier des charges ambitieux

TABLE 3.1 – Les différentes structures de drones, leurs avantages et inconvénients et leurs applications phares

Structures de drones	Avantages	Inconvénients	Applications types
Ailes fixes	Endurance ou rayon d'action élevés ; vitesse maximale élevée	Décollages et atterrissages difficiles (besoin d'espace et/ou d'une infrastructure) ; réalisation sur mesure complexe ; pas de vol stationnaire	Cartographie d'un terrain ; collecte de données atmosphériques à haute altitude
Multi-rotors	Décollage et atterrissage simples ; possibilités de vol stationnaire et près du sol ; trajectoires 3D complexes	Faible autonomie ; perturbation du flux d'air autour des capteurs	Exploration d'environnements inconnus (en intérieur ou extérieur) ; navigation dans des lieux difficiles d'accès
Hybrides (moteur, ailes ou corps basculant)	Grande enveloppe de vol ; mixe les avantages des ailes fixes et tournantes	Complexité de la mécanique ou de la commande ; sensibilité aux rafales en vol lent	Transport de marchandises sur de grandes distances depuis ou vers des zones urbaines

et idéal des caractéristiques souhaitées pour les drones. Les nuages ciblés par le projet **NEPHELAE** sont de type cumulus. Ces nuages ont une forme moutonneuse caractéristique et évoluent à une altitude se situant entre 300 et 3000 mètres selon le site géographique (1). Un cumulus commence généralement sa croissance au dessus de la mer à quelques dizaines de kilomètres des côtes (2) et se développe au fur et à mesure qu'il se rapproche de la terre ferme (3). L'aérologie à plusieurs centaines de mètres d'altitude est différente de celle proche du sol. Les vents assez forts peuvent changer rapidement de direction entraînant des phénomènes de cisaillement. De plus, les vents autour et à l'intérieur d'un nuage sont très différents. A l'extérieur, on retrouve le plus souvent du vent descendant et à l'intérieur du vent ascendant (4). En revanche, la vitesse de déplacement d'un nuage est directement liée au vent constant qui compose son environnement (5). Il paraît évident que les nuages sont des volumes spatiaux très larges. Si on les considère comme des cylindres, leur rayon peut varier de 200 et 500 mètres et leur hauteur de plusieurs centaines à plusieurs milliers de mètres (6). La durée de vie d'un nuage est assez courte : entre 20 à 40 minutes, ce qui en fait un phénomène fortement dynamique et observable durant une courte fenêtre de temps (7).

La conception d'un drone capable d'évoluer dans un environnement aussi contraignant est un travail à part entière qui a été mené par un post-doctorant dans le cadre du projet **NEPHELAE**. Les principaux critères sélectionnés pour développer cet **UAV** sont les suivants :

- Autonomie du drone élevée (1, 5, 6) : Le drone doit pouvoir voler à haute altitude pendant au minimum une heure et doit pouvoir explorer des nuages

se trouvant à des dizaines de kilomètres de son point de décollage.

- Drone résistant à l'eau et à la corrosion (2) : le drone doit être imperméable afin de résister à la forte concentration en eau liquide présente dans un nuage.
- Drone maniable et rapide (3, 4, 5, 7) : Le drone ne doit pas être impacté par les changements de direction et de force du vent. Il doit être en mesure d'effectuer des virages serrés et de maintenir une vitesse de croisière afin de contrer efficacement le vent environnant.
- Décollage et atterrissage adaptés : méthodes de décollage et atterrissage adaptées aux vitesses du drone et au terrain choisi.
- Capacité d'embarquer une charge utile assez importante en terme de capteurs, de l'ordre de 800 grammes.

Dans le cadre du projet **NEPHELAE**, c'est le post-doctorant Aurélien Cabarbaye qui a travaillé sur la conception d'un drone capable de répondre aux attentes des météorologues. Son travail a notamment conduit au développement d'une flotte de ces drones baptisés *CabFly* [Cabarbaye 2018, Cabarbaye 2019].

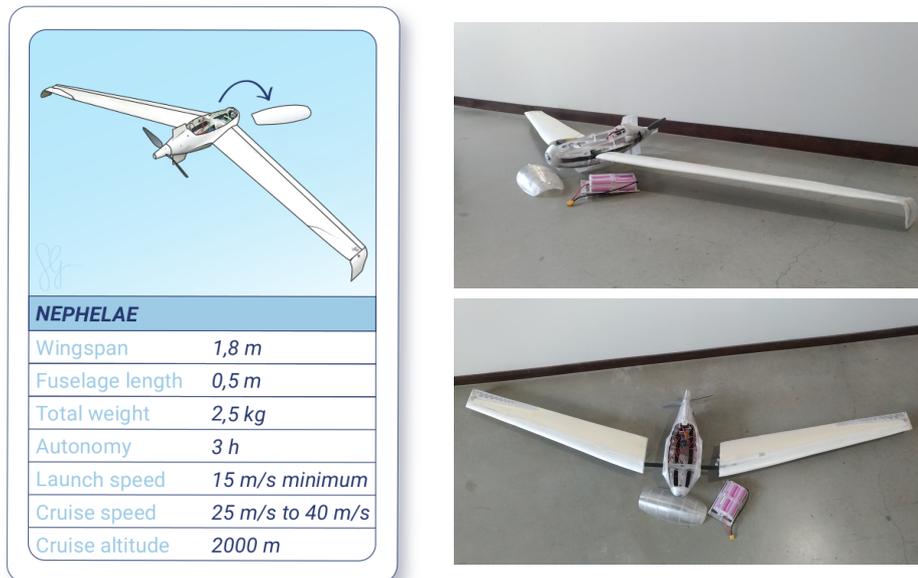


FIGURE 3.2 – Vue schématique de l'UAV *CabFly* et de ses caractéristiques ainsi que plusieurs photos

En ce qui concerne la charge utile, les drones peuvent embarquer tout type de capteurs permettant l'observation du phénomène considéré. Il peut s'agir de capteurs atmosphériques classiques mesurant la pression, la température ou l'humidité, de sonde pitot à cinq trous pour mesurer les turbulences et le champ de vent en 3D, de capteurs d'aérosols pour collecter la composition de l'air environnant, de capteurs déterminant la concentration en eau liquide, ...

3.2.2 Pallier les contraintes de communication dans de telles missions

De façon générale, tous les phénomènes atmosphériques évoluent à une certaine altitude qui peut atteindre jusqu'à plusieurs kilomètres. A cette hauteur, le vent advectif, quasiment toujours présent, pousse les phénomènes à se déplacer sur des distances pouvant atteindre des kilomètres. Pour assurer un suivi et une exploration par les drones, il faut qu'ils soient en mesure de communiquer. Le premier objectif en terme de communication est de garantir un lien quasi continu entre la station sol et n'importe quel UAV de la flotte. Cette contrainte est aussi réglementaire car l'opérateur doit être capable de suivre la position des drones et de reprendre le contrôle en cas de besoin. Les systèmes classiques ne permettent qu'une communication à quelques kilomètres avec néanmoins un débit élevé. En utilisant un modem longue portée et en réduisant le débit de la transmission Air-Sol, il est possible de suivre avec une latence raisonnable les mesures en temps réel des drones et de leur envoyer des tâches à réaliser. Cette architecture réseau est centralisée et permet de revenir à une planification ou une gestion manuelle des vols centralisée en cas de besoin.

L'idée pour pallier les problèmes des architectures centralisées serait de concevoir une architecture de communication distribuée. Donner la capacité à chaque drone de communiquer à la station sol et aux autres membres de la flotte permettrait de ne plus compter sur un seul nœud pour faire passer des messages. Cela pourrait se faire notamment par l'utilisation d'un réseau à plus petite portée et de topologie ad-hoc

La contrainte de communication directe avec le sol étant imposée, il conviendrait de combiner deux réseaux, un longue portée et centralisé avec un courte portée et distribué. La flotte pourrait être déployée à des dizaines de kilomètres de la station sol sans crainte de perte de communication tout en conservant un réseau courte portée autorisant les communications entre drones. Cette solution n'a pas pu être mise en œuvre au cours de la thèse, mais sera probablement nécessaire pour de futurs travaux sur la prise de décision distribuée au vue de la charge réseau sur la liaison Air-Sol.

3.3 Modélisation des nuages

L'objectif de ce projet est de construire de nouveaux modèles pour l'évolution du nuage. Néanmoins, il convient de distinguer la modélisation faite par les météorologues en traitant les données de vol, de celle réalisée en temps réel sur la station sol pour permettre aux scientifiques de suivre l'évolution du nuage et donner des consignes à la flotte ou encore celle réalisée à bord des drones pour le guidage adaptatif.

Même si il est impossible pour le moment d'avoir des modèles très précis de l'évolution du nuage, des chercheurs ont déjà établi des liens entre certains paramètres macroscopiques d'un nuage et son cycle de vie [Lamraoui 2014, Lamraoui 2016, Naud 2018]. Grâce à des simulations microphysiques intensives de l'atmosphère, ils

ont défini un premier modèle conceptuel (macroscopique) pour les cumulus continentaux, qui relie les principaux paramètres météorologiques (courant ascendant, entraînement) à la géométrie de base des nuages (largeur, hauteur, rapport d'aspect). Par exemple, ils ont estimé des relations linéaires entre le diamètre de la base des nuages, la hauteur des nuages et les flux verticaux. Ce genre de relation permettent entre autres de prendre comme modèle des formes géométriques simplifiées telles qu'un cercle (en 2D) ou un cylindre ou un parabolöide (en 3D).

Les travaux réalisés ont nécessité l'utilisation d'une simulation pour valider le comportement des drones lors de leur phase d'exploration. Pour les besoins de **NE-PHELAE**, le CNRS a conduit des simulations avec MesoNH, modèle atmosphérique méso-échelle non hydrostatique de la communauté française de recherche [Lac 2018]. Il est développé par le Laboratoire d'Aérodynamique et par le CNRM. La simulation utilisée s'appelle BOMEX. Elle est composée de mailles d'une résolution spatiale de 25 mètres dans les trois directions, sur un domaine de 12,8x12,8x4 kilomètres. La résolution temporelle est de 5 secondes pendant 30 minutes. Pour chaque maille définie par sa position absolue (X, Y, Z), on retrouve différentes données thermodynamiques du modèle : eau liquide (RCT) qui permet de calculer le Liquid Water Content (LWC), contenu en vapeur d'eau (RVT), précipitation liquide (RRT), température potentielle (THT), U,V,W (vent relatif dans les 3 directions) et pression.

Ce type de modèle permet de fournir un environnement extrêmement réaliste mais nécessite de nombreuses heures de calculs sur les calculateurs de Météo-France, et produit plusieurs centaines de Giga Octets de données. Il permet des simulations pendant la phase de développement des stratégies de vol, que ce soit en figeant le temps pour avoir un nuage statique ou en prenant en compte la dynamique et le vent. Le critère qui permet de définir le nuage par rapport à l'air libre est la teneur en eau liquide (LWC), qui représente la masse d'eau liquide dans un nuage pour une quantité donnée d'air sec, une information essentielle en microphysique des nuages.

Le modèle de nuage utilisé en temps réel par la station sol exploite la continuité des paramètres physiques autour de chaque point de mesure avec un processus de régression gaussien (GPR) [Reymann 2018]. L'intérêt de cette approche est qu'elle peut fonctionner avec peu ou pas d'hypothèse sur la forme macroscopique du nuage et qu'elle fournit une carte d'incertitude. Cette dernière peut être exploitée pour déterminer les zones qui n'ont pas été suffisamment explorées. L'inconvénient est que la puissance de calcul nécessaire est trop importante pour réaliser des calculs embarqués. Ce modèle est donc construit au sol, sur la base des données transmises par les UAVs.

Enfin, les drones eux-mêmes peuvent avoir besoin d'un modèle conceptuel simple d'un nuage dont l'objectif n'est pas d'être exploité par des scientifiques de l'atmosphère, mais de fournir suffisamment d'informations pour le guidage de la flotte. Des modèles géométriques simplistes peuvent être suffisants pour calculer des estimations de coûts pour la phase de planification. L'estimation du centre du nuage est par exemple faite à partir des détections de la frontière avec un calcul de barycentre et permet au schéma de vol adaptatif *Rosette* (présenté dans le chapitre 4) de s'adapter au mouvement du nuage à explorer.

3.4 Architecture du système

3.4.1 Architecture idéale

L'architecture d'un système définit les différents composants qui le constituent, puis liste les interactions entre ces composants et précise leur localisation. Cette partie développe le système idéal qui permettrait de mettre en place une flotte de drones pour l'exploration d'un environnement inconnu tout en respectant une approche distribuée.

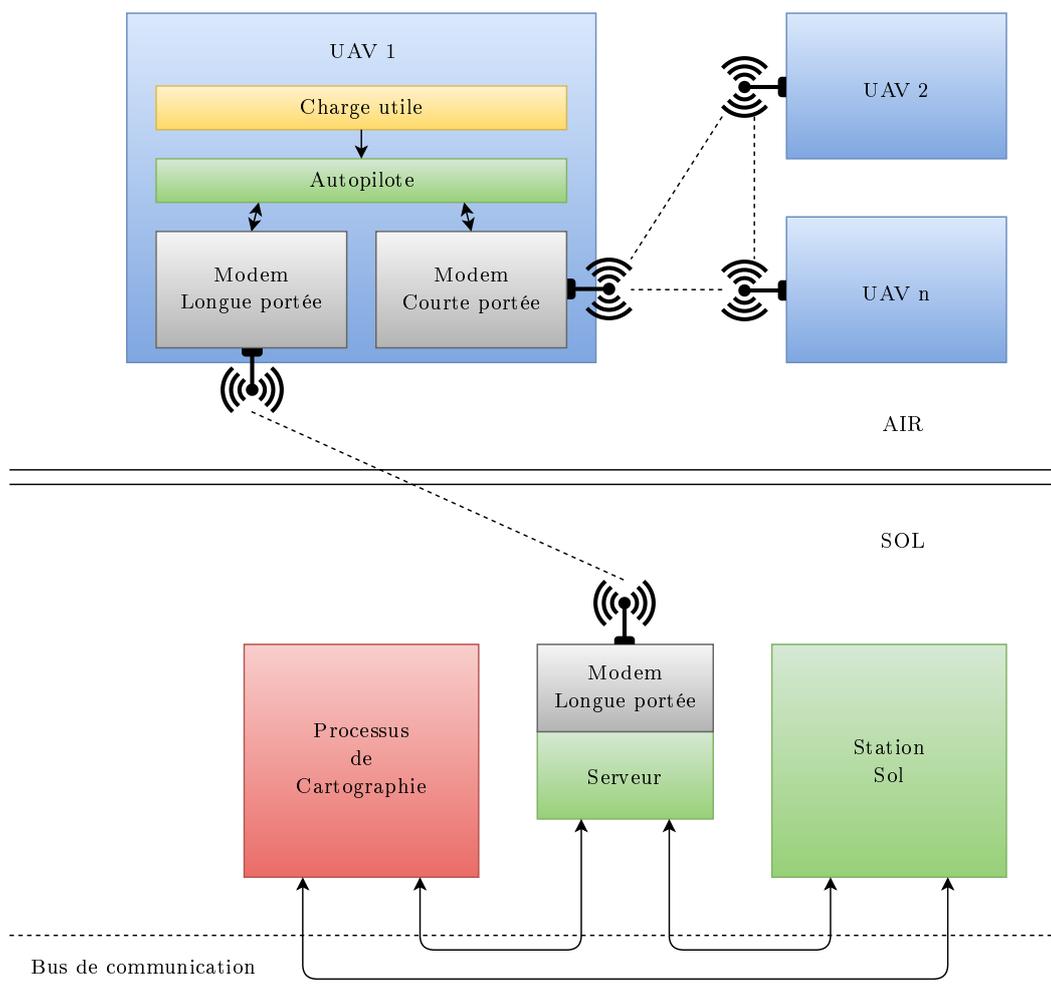


FIGURE 3.3 – Architecture physique du système de flotte de drones

La figure 3.3 donne une vue d'ensemble de l'architecture physique des différents éléments qui composent la flotte de drones. L'architecture est composée de plusieurs UAVs, disposant d'une charge utile, d'un ou plusieurs modems différents (longue et courte portée) et d'un autopilote. Dans ce dernier bloc on retrouve les fonctions classiques des autopilotes (guidage, navigation, contrôle) ainsi que les schémas de vol utilisés pour réaliser des trajectoires définies. La modularité du système autopilote

fait qu'il est possible de rajouter une autre carte embarquée (telle qu'une Arduino ou une Raspberry Pi) afin d'ajouter des algorithmes qui viennent compléter les fonctionnalités de l'autopilote, tels que des algorithmes de décision, d'évaluation du contexte ou de cartographie. On retrouve également dans ce schéma la partie sol, composée de la station de contrôle, des outils de cartographie (trop lourd en puissance de calcul pour être embarqués) et d'affichage des données capteurs, d'un bus de communication logiciel et finalement d'un modem.

Le schéma 3.4 présente les différents algorithmes et programmes qui composent le système au sens large (en reprenant certains composants physiques pour une meilleure compréhension). La distinction entre les composants en l'air et au sol n'est pas clairement définie puisque l'objectif est de détailler la logique présente derrière l'ensemble du système, cependant il est facilement détectable là où est située la frontière. Sur ce schéma, il est possible de retrouver l'ensemble des éléments présentés dans l'architecture physique du système (figure 3.3). Les différents composants de cette architecture fonctionnelle sont les suivants :

- La station sol permet de suivre l'évolution de chaque drone, de vérifier et modifier certains paramètres de vol et également de contrôler l'exécution des tâches. Ce bloc permet aussi de contrôler les drones un par un.
- Le logiciel de cartographie récolte les mesures de tous les drones de la flotte en temps réel et construit une carte des nuages potentiellement détectés avec une incertitude associée à chaque zone.
- Les deux entités citées précédemment exploitent le modem longue portée pour envoyer ou recevoir des informations de n'importe quel drone de la flotte. Les modems de communication longue et courte portée permettent de maintenir une communication possible, respectivement Air-Sol et Air-Air.
- La charge utile est composée de plusieurs capteurs qui fournissent différentes mesures sur les propriétés atmosphériques de l'environnement qui entourent le drone. Ces mesures peuvent être directement envoyées aux éléments se trouvant au sol ou peuvent alimenter un modèle simplifié du nuage.
- Un algorithme est chargé d'évaluer les parties manquantes ou imprécises du modèle et ainsi de déterminer quelle nouvelle tâche doit être créée.
- Selon la nature de la tâche créée, le créateur peut générer une tâche avec les paramètres associés.
- Cette nouvelle action est ensuite transférée au programme de décision distribuée qui se sert notamment de la communication courte portée pour interagir avec les autres agents et l'affecter à un drone en particulier.
- Une fois la tâche attribuée à un agent, celle-ci doit être validée par un opérateur au sol avant d'être rajoutée à la séquence de tâches du drone.
- L'exécution de la tâche courante se sert des différentes informations fournies par le système pour une réalisation efficace. Celles-ci peuvent être de diverses natures : transmission ou récupération de données depuis un autre agent,

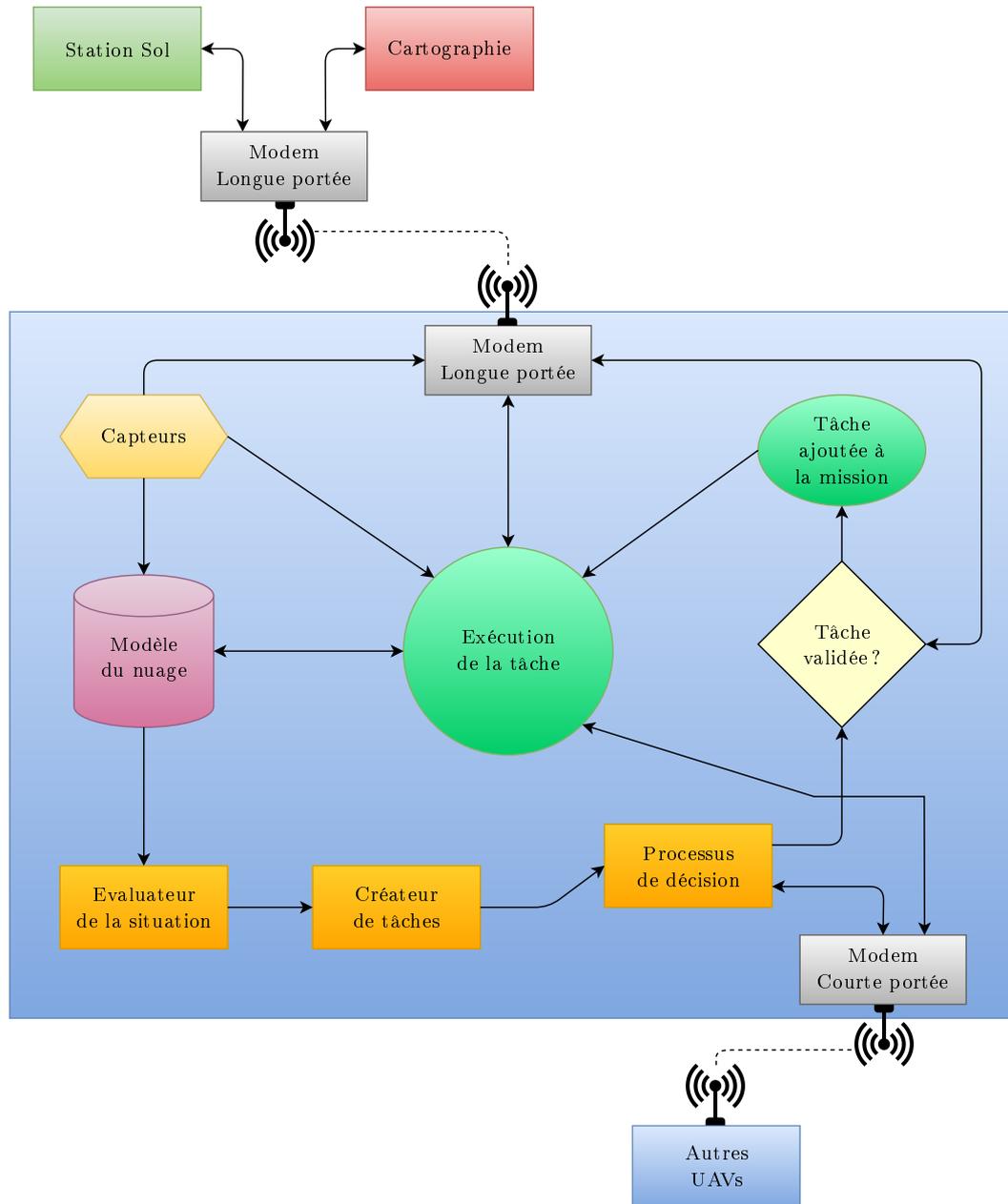


FIGURE 3.4 – Architecture fonctionnelle d'un UAV pour l'exploration de nuages

exécution d'une trajectoire à l'aide des données des capteurs de la cartographie ou du modèle du nuage, coordination d'une tâche avec un autre agent, . . .

3.4.2 Architecture effectivement déployée

Une partie des éléments d'architecture présentés précédemment n'ont pas pu être développés et testés au cours de la thèse. La priorité a été mise sur les aspects permettant la réalisation des objectifs scientifiques et techniques du projet *NEPHELAE*. Cette section présente donc l'architecture qui a été effectivement mise en œuvre et qui a permis de se concentrer sur l'autonomie de vol des drones au niveau des schémas de vol, laissant le processus de décision centralisé et à la charge des opérateurs de la station sol.

Ainsi, l'architecture du système, figure 3.5, reprend une partie des composants présentés dans la section 3.4 et s'appuie principalement sur le système de drones Pappas (PPRZ, en vert) pour l'implémentation de nouveaux modules. Les différents composants de PPRZ sont en charge du contrôle du vol à bord, de la communication (établie par un modem central qui diffuse les données sur le middleware de PPRZ appelé *IVY* [Buisson 2002]) et offre une station de contrôle au sol unique pour tous les drones. Les schémas de vol classiques intégrés disponibles dans l'autopilote ne sont pas adaptés pour ce projet et de nouvelles fonctions de navigation adaptatives ont été ajoutées au système afin de réagir aux valeurs des capteurs à bord. Ces *schémas de vol adaptatifs*, développés dans le chapitre 4, peuvent être configurés et déclenchés par un message de communication classique vers l'UAV (en bleu).

La seconde partie de ce système est le système de cartographie adaptative des nuages (CAMS, en rouge) développé par le LAAS-CNRS. Connecté au bus *IVY*, il peut lire directement les mesures envoyées par les drones. Pour ce cas d'étude, seul le contenu en eau liquide (LWC), qui caractérise la présence d'un nuage, est exploité. La tâche principale de CAMS est de construire la carte des nuages. Il offre également différents affichages dans une application web : une interface pour les scientifiques de l'atmosphère afin d'avoir une vue directe sur les valeurs des capteurs en temps réel ; une interface pour le contrôle de la flotte et enfin une interface principale pour afficher la carte des nuages détectés.

Dans sa version actuelle, CAMS est surtout une interface pour les opérateurs (en orange), qui contrôlent la flotte sur la base des cartes construites. Ce composant permet également d'effectuer des simulations. En effet, CAMS est capable de récupérer directement des données depuis une simulation MesoNH telle que celle de BOMEX (en violet).

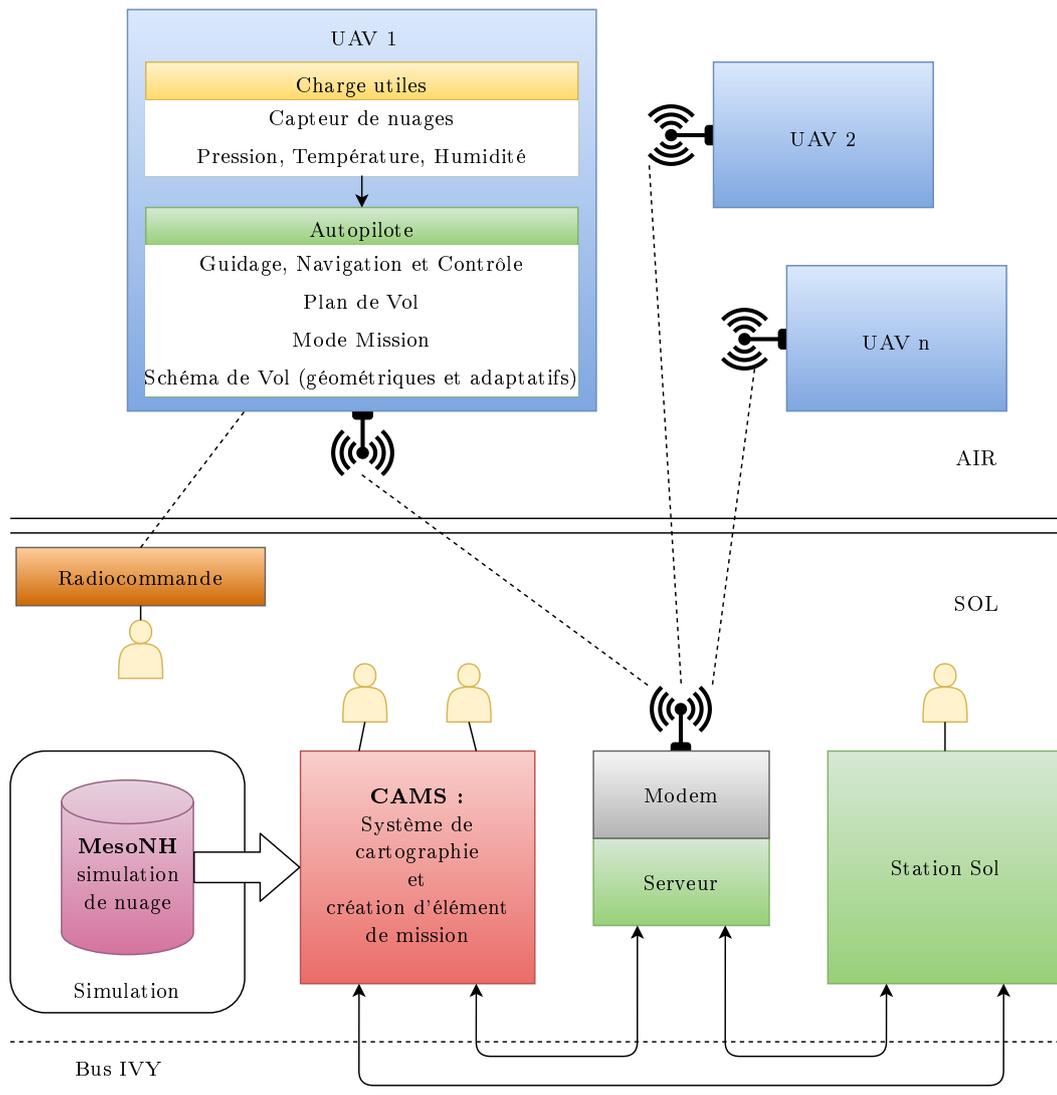


FIGURE 3.5 – Architecture du système de flotte de drones développée pour le projet NEPHELAE

Motifs de navigation adaptatifs pour l'exploration d'environnements dynamiques

Contents

4.1	Mise en place de la stratégie d'exploration globale	49
4.1.1	Définition de zones d'intérêt	50
4.1.2	Opération type, plan de vol et séquençement des tâches . . .	51
4.1.3	Schémas de vol basiques intégrés autopilotes	53
4.1.4	Module de détection	54
4.2	Motifs adaptatifs	54
4.2.1	Le Lace	62
4.2.2	Le Trinity	65
4.2.3	Le Rosette	69
4.2.4	Spirale conique oblique	73

L'objectif de ce chapitre est de détailler les schémas de vol adaptatifs utilisés pour l'exploration des nuages. Ces schémas ont pour but d'améliorer l'efficacité de la recherche en se focalisant sur les zones d'intérêt, de réduire la latence du système en se basant le plus possible sur les mesures effectuées à bord des drones et de décharger l'opérateur d'une tâche de guidage trop complexe.

La Figure 4.1 montre la séquence des travaux de la thèse. Ce chapitre présente l'intégralité de ces développements, y compris le mode *RECOVER* qui n'a pas encore été intégré dans le système – et n'a donc pas été exploité lors des expérimentations qui seront présentées dans le chapitre suivant.

4.1 Mise en place de la stratégie d'exploration globale

La présentation des caractéristiques des nuages dans le chapitre précédent a montré que l'exploration et la collecte de données in-situ dans un tel environnement est une tâche difficile à accomplir. Bien qu'il existe quelques méthodes dans la littérature sur l'exploration d'environnements dynamiques en mer avec des robots sous-marins ou sur terre avec des robots terrestres, aucune n'est complètement adéquate pour cette mission. Les principales difficultés résident dans le volume très

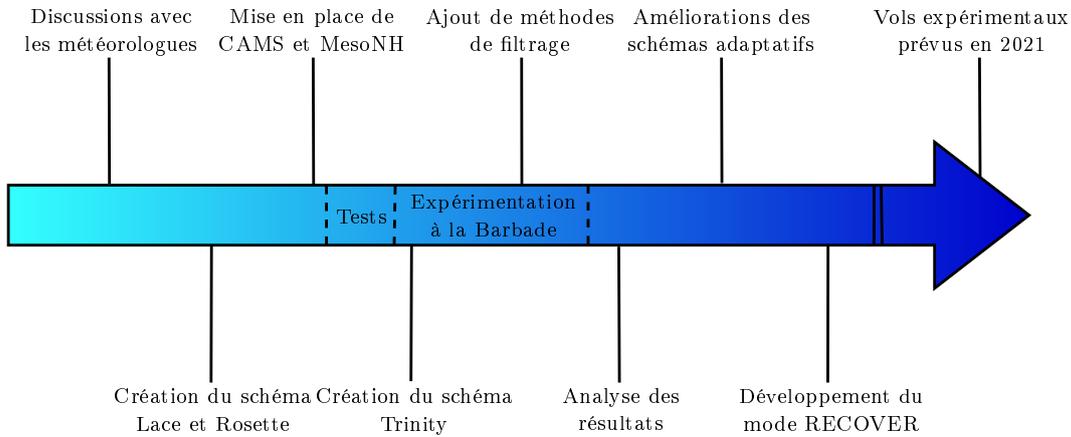


FIGURE 4.1 – Chronologie des développements réalisés pendant la durée de la thèse

large à couvrir, évoluant en forme dans le temps et se déplaçant par rapport au sol. Déployer une flotte assez grande pour couvrir l'ensemble de l'environnement de manière systématique ne paraît pas faisable vue l'importance du volume à observer (jusqu'à 1 kilomètre cube). Cette section permet de comprendre comment ont été définies les zones d'intérêt où collecter des données dans un nuage et également de montrer les limites des schémas de vol classiques des autopilotes.

4.1.1 Définition de zones d'intérêt

La première étape était de bien comprendre les besoins des scientifiques de l'atmosphère en terme de collecte de données. Quelles données souhaitent-ils récupérer ? Comment doivent-elles être mesurées ? En quoi ces mesures pourront donner une idée de l'évolution du nuage ? Où les drones peuvent-ils collecter ces informations ?

Les scientifiques de l'atmosphère ont défini un ensemble d'informations à collecter afin de suivre et de surveiller les différentes étapes de la vie d'un cumulus, de la formation du nuages (dominée par les courants d'air ascendants) à la dissipation (dominée par l'entraînement aux frontières du nuage). Ces informations définissent différentes zones à cartographier par les drones. Elles sont illustrées dans la Figure 4.2.

Les informations à recueillir dans ces zones sont les suivantes :

- A la base du nuage (en violet) : la forme du contour du nuage, la répartition du LWC et le vent vertical à l'altitude de la base. Ces informations définissent en particulier le "centre" (ou noyau) du nuage où le courant ascendant est le plus élevé.
- Les cumulus présentent une colonne centrale où les courants ascendants sont très importants quand le nuage est en croissance. La forme de cette colonne se rapproche grossièrement d'un cône tronqué incliné (pointillés au centre). L'intérêt principal de la collecte d'informations dans cette zone est de suivre l'évolution du vent vertical pendant toute la durée de vie du nuage.

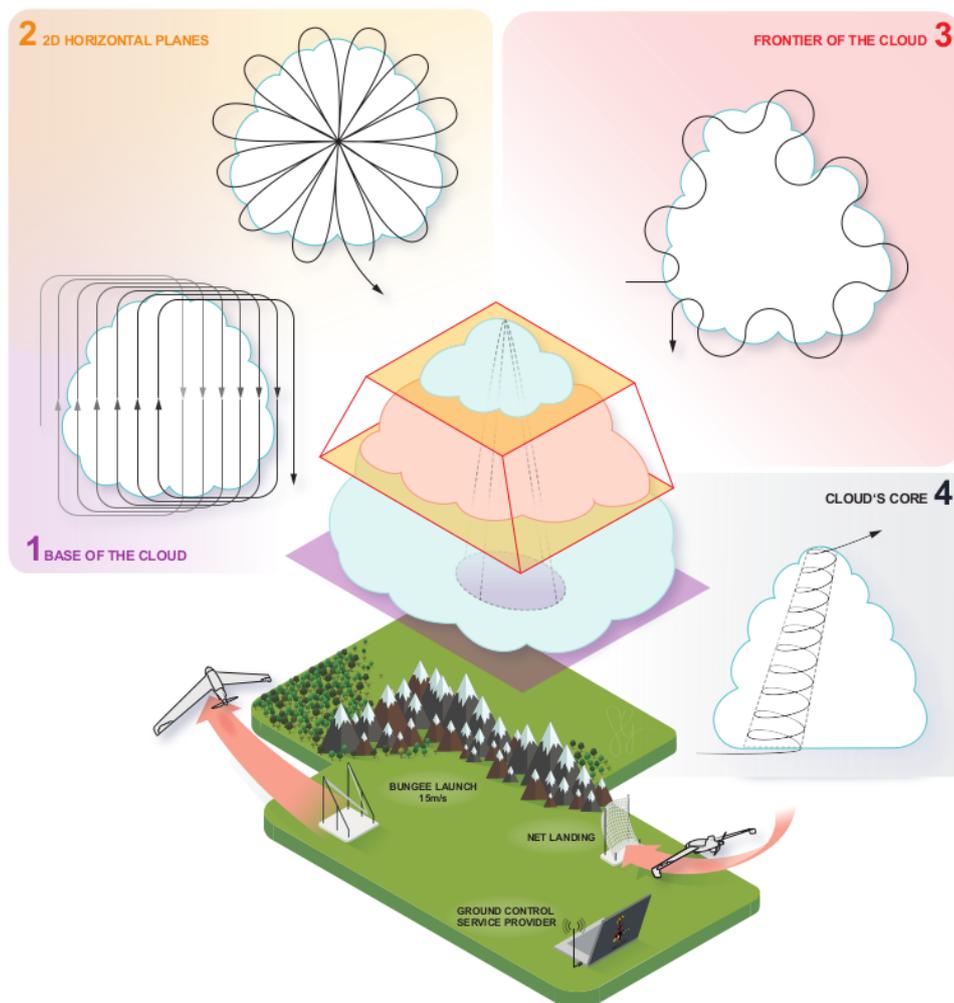


FIGURE 4.2 – Les différentes zones d'intérêt où collecter des données intéressantes dans un nuage

- En cartographiant le champ des vents verticaux sur plusieurs plans horizontaux à différentes altitudes du nuage (plan en orange), il est possible d'estimer des flux (d'air et d'eau) à l'intérieur du nuage.
- Enfin, il est essentiel de mesurer le vent vertical, les turbulences et l'évolution du **LWC** aux frontières du nuage (en rouge).

Le fait d'avoir défini des zones de collecte de données permet de déterminer la fréquence d'exploration de chaque partie en fonction de la durée de vie du nuage.

4.1.2 Opération type, plan de vol et séquençage des tâches

Pour une meilleure compréhension de la suite de ce chapitre, il est important de comprendre chaque étape de la mission et de détailler les mécanismes qui entrent

en jeu pour la planification et le séquençement des tâches.

L'objectif de la mission est clair : collecter des données dans un nuage qui se trouve à une certaine altitude et à une certaine distance du point de décollage de la flotte de drones. Avant de commencer la mission, les scientifiques de l'atmosphère sont chargés de se renseigner sur les conditions météorologiques et la possible présence de nuages dans la zone de vol. Les informations telles que l'altitude de la base des nuages ou encore le vent relatif sont essentielles avant de lancer les drones. La première étape est donc de faire décoller les drones un par un puis de les faire attendre, à une altitude relativement faible, afin que tous les drones de la flotte soient en l'air. La seconde étape est de les éloigner du point de décollage avant de prendre de l'altitude en exécutant une spirale montante. Une fois arrivé à l'altitude correspondante à la base des nuages, l'ensemble de la flotte part jusqu'à la zone de recherche des nuages. Dans cette zone, chaque drone se voit confier l'exécution d'un schéma de vol hippodrome avec des orientations, altitudes et paramètres différents. De la sorte, la flotte couvre une grande partie de la zone de vol et reste en attente de la détection d'un nuage. Si un drone traverse un nuage, les opérateurs au sol doivent s'en apercevoir à l'aide des différentes interfaces temps réel disponibles. A partir de ce moment, la position du nuage détecté est enregistrée et mise à jour avec le vent relatif connu. Les opérateurs décident ensuite s'il faut déclencher un mode de vol appelé *mission*, qui permet de lancer les schémas de vol adaptatifs, ou s'il est préférable de laisser passer ce nuage et de rester dans l'étape de recherche. Les étapes *recherche* puis *mission* sont répétées autant de fois que l'autonomie des drones le permet. Les dernières phases correspondent à un retour proche de la station sol, une descente en spirale et finalement l'atterrissage du drone.

Excepté le mode *mission* qui est un peu particulier, l'ensemble de ces étapes sont définies par un plan de vol. Ce dernier permet de définir et de paramétrer en avance les différentes actions qui sont réalisées pendant une opération. Il présente un certain nombre de blocs de commandes et de variables qui s'enchaînent selon des conditions. Typiquement, un drone passe automatiquement du bloc *décollage* au bloc *attente* des autres drones lorsqu'il atteint une altitude sécuritaire de 30 mètres. Pour plus d'informations sur les plans de vol se référer à la Figure A.1 dans l'Annexe A.

Le mode *mission* correspond à un bloc particulier qui permet d'enchaîner diverses tâches en séquence sans planification au préalable comme dans le plan de vol. De la sorte, une fois que le drone entre dans le bloc *mission* sur le plan de vol, il se retrouve avec une pile de tâches à réaliser. Au début cette pile est vide, mais elle se remplit à la réception de messages spécifiques. Ces messages détaillent l'action à réaliser (un schéma classique ou un schéma adaptatif) ainsi que l'ensemble des paramètres qui l'accompagnent. Le drone se retrouve donc avec une pile de tâches à réaliser pour lesquelles les opérateurs ou lui même peut choisir d'en supprimer, de passer à la suivante ou bien de nettoyer complètement la liste. Cette approche permet d'envoyer des actions qui n'ont pas été planifiées à l'avance et représente donc un mécanisme crucial de la stratégie d'exploration adaptative. Pour plus d'informations sur le mode mission se référer à la Figure A.2 dans l'Annexe A.

4.1.3 Schémas de vol basiques intégrés autopilotes

La plupart des autopilotes existants (PixHawk, ArduPilot, Paparazzi, ...) proposent des fonctions, appelées trajectoires ou schémas de vol, qui permettent aux drones de naviguer selon un chemin prédéfini. L'objectif du drone est alors de corriger son état actuel pour arriver vers un état désiré. D'une façon générale, ces schémas de vol basiques sont paramétrés avec des variables représentant des coordonnées ou des dimensions et s'enchaînent en suivant une séquence définie par l'opérateur. Des formes plus complexes sont possibles par un assemblage de formes géométriques simples comme des cercles et des lignes. La figure 4.3 expose les différents schémas de vol basiques proposés notamment dans le système PPRZ.

L'utilisation de ces motifs géométriques est généralement dédiée à guider les drones dans un environnement statique. Cependant, quelques astuces permettent de les rendre dynamiques. Par exemple, en modifiant régulièrement les coordonnées du centre du cercle, il est possible d'obtenir des trajectoires considérées comme dynamiques. Toutefois, il ne faut pas perdre à l'esprit que ces trajectoires sont définies géométriquement et qu'elles ne sont en aucun cas réactives par rapport à des éléments perçus en vol (outre la position du drone bien sûr). Il s'agit donc de solutions transformant des motifs classiques statiques en dynamiques mais en aucun cas de conceptions de nouvelles fonctions de navigation.

L'ensemble des motifs de base sont des motifs géométriques et géo-références. Or il faut un temps de réponse court pour modifier les paramètres des schémas de vol afin d'obtenir un suivi intéressant des nuages. Cette tâche est acceptable pour un opérateur contrôlant un seul drone, mais devient laborieuse voire impossible lorsqu'il s'agit de contrôler une flotte. Les cumulus ciblés s'étendant et se déplaçant avec le vent horizontal, il est donc nécessaire d'ajuster constamment la trajectoire de chaque UAV pour rester à l'intérieur ou pour franchir la frontière du nuage de manière répétée.

En ce sens, les motifs de base sont difficiles à mettre en place et ne permettent pas un échantillonnage efficace d'un nuage. La solution est de concevoir des schémas de vol qui utilisent directement les mesures des capteurs pour adapter la trajectoire

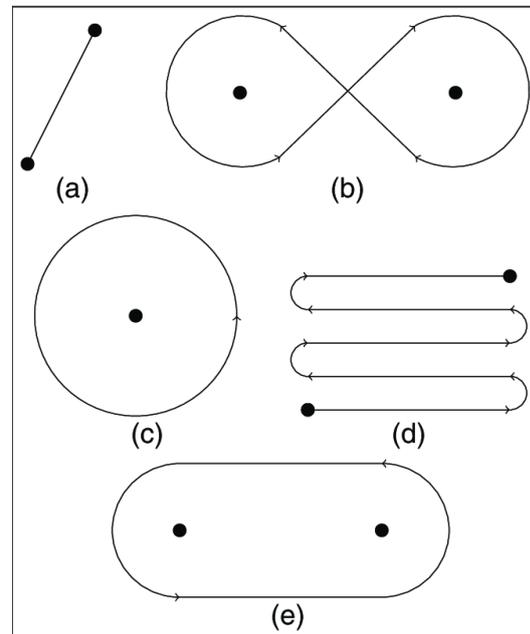


FIGURE 4.3 – Les schémas de vol géométriques intégrés à l'autopilote Paparazzi : a) Une ligne (ou GoTo) b) Un huit c) Un cercle d) Une patrouille (ou Survey) e) Un hippodrome

de manière autonome en fonction de l'environnement.

4.1.4 Module de détection

La détection d'un nuage se réalise grâce à deux mécanismes. L'un réalisé manuellement par un opérateur expert en science de l'atmosphère qui est capable avec l'ensemble des mesures en temps réel (LWC, humidité, température, pression, vent vertical) de déterminer si le drone est bien dans un nuage. Ce mécanisme sert notamment d'élément déclencheur pour passer de la phase *recherche* à la phase *suivi de nuage*. En pratique la position du nuage est enregistrée lors de sa détection puis mise à jour par le système CAMS avec le vent relatif estimé, pour finalement servir de point cible pour créer un élément de mission. Dans le futur, ce couplage des données permettant de déterminer la position du drone par rapport au nuage pourrait être réalisé de façon autonome afin que chaque membre de la flotte puisse évaluer une possible cible sans l'intervention d'un opérateur.

Le second mécanisme de détection est automatique. Il fournit l'information principale utilisée par les schémas adaptatifs pour corriger leur trajectoire. La caractéristique la plus importante d'un nuage est représentée par sa contenance en eau liquide, soit la mesure donnée par le capteur de LWC. La difficulté réside dans l'utilisation de ce signal continu afin de renvoyer au schéma un signal binaire : dans le nuage (IN) ou en dehors du nuage (OUT). Les simulations de nuage étant composées de valeurs comprises entre un minimum et un maximum, la détection d'une bordure de nuage se fait seulement avec une valeur seuil fournie par les météorologues. Au dessus de cette valeur, le drone est dans le nuage ; en dessous, il est en dehors. Cependant, l'utilisation du capteur de LWC en pratique s'avère plus compliquée. Pour réduire le bruit sur le signal du capteur, un premier filtrage passe-bas de premier ordre est appliqué. Ensuite, pour éviter les oscillations à la frontière dues au bruit résiduel, la détection ne se fait plus avec un simple seuil mais avec un comparateur à hystérésis réglable. Ainsi l'entrée et la sortie du nuage se fait sur des valeurs suffisamment hautes ou suffisamment basses respectivement. Les paramètres du filtre ainsi que les seuils de l'hystérésis sont réglés directement en vol pour correspondre au mieux aux caractéristiques atmosphériques du moment.

4.2 Motifs adaptatifs

Le développement des schémas de vol adaptatifs constitue la contribution principale de cette thèse. Ces fonctions de navigation particulières répondent aux problématiques imposées par l'exploration d'un environnement aussi dynamique qu'un nuage. La mission type d'exploration d'un nuage est composée de plusieurs étapes mais la plus intéressante correspond à l'étape du suivi du nuage. C'est lors de cette étape que les schémas de vol (adaptatifs ou géométriques) sont créés puis ajoutés à la liste de tâches correspondant au bloc *mission*. Cette section explique en détail la logique et l'algorithmique qui définissent ces schémas de vol adaptatifs et décrit le comportement résultant des drones.

L'idée est de créer plusieurs schémas de vol facilement exécutables pour l'UAV possédant une puissance de traitement limitée qui répondent aux demandes des opérateurs selon chaque zone d'intérêt (cf. Figure 4.2). La solution mise en œuvre n'est pas une méthode de planification de trajectoire optimale pilotée par un critère d'utilité, mais plutôt un ensemble de schémas adaptatifs déclenchés par les mesures des capteurs en temps réel. Le module de détection présenté précédemment joue un rôle majeur dans l'exécution de l'algorithme puisqu'il est le principal responsable du comportement du schéma. Le choix des mesures à utiliser, la façon de les filtrer ou de les fusionner ont un impact direct sur la trajectoire suivie par le drone.

De façon générale, la même logique contrôle ces différents schémas de vol. Le logigramme présenté dans la Figure 4.4 donne une vue d'ensemble du déroulement des algorithmes décrivant les schémas adaptatifs. Pour bien le comprendre il faut imaginer que le drone va tout juste passer dans l'étape *suivi de nuage* de la mission. Il est donc en dehors du nuage et les opérateurs possèdent juste une information a priori de la position d'un nuage (croisé auparavant ou détecté par un autre système). Pour lancer ces fonctions de navigation le drone a besoin de certains paramètres qui seront expliqués au fil du chapitre. Le premier paramètre est la position présumée du nuage (latitude, longitude et altitude). Pour que le drone puisse calculer sa trajectoire de façon autonome et qu'il suive le déplacement du nuage, il faut que ce point cible se déplace à la vitesse du nuage. Le second paramètre apporté aux fonctions de navigation est la composante horizontale du vent estimée par le drone ou la station sol. Enfin, un troisième paramètre est ajouté correspondant à la vitesse verticale désirée, ce qui permet au drone d'effectuer des trajectoires dans les trois dimensions plutôt que d'évoluer seulement dans un plan 2D.

Dans la Figure 4.4 la flèche bleue correspond à l'entrée dans un mode de navigation adaptatif. Pour une meilleure compréhension du logigramme, voici une liste des points importants :

- Dans l'état *Recherche*, le drone a pour objectif d'atteindre le point cible, ce dernier étant mis à jour régulièrement avec le vent relatif estimé.
- Pour passer dans l'état *ExplorationIn*, il faut que le drone valide un certain nombre de conditions appelées *ConditionIN*. Si toutes les conditions sont respectées, le drone s'estime dans le nuage et commence à exécuter le comportement lié au type de schéma de vol. Sinon, il continue d'essayer d'atteindre le point ciblé.
- Les conditions d'entrées (*ConditionIn*) dans le nuage ont beaucoup évolué au fil du projet. Au tout début, le simple dépassement de la valeur du seuil de *LWC* était suffisant pour s'estimer dans un nuage. Les premières expérimentations et tests ont alors permis de déceler des comportements anormaux et d'autres conditions ont été ajoutées. En plus de devoir dépasser le seuil de *LWC*, le drone doit également être assez proche de la cible pour éviter de se tromper de nuage et doit avoir passé un certain temps dans le nuage pour être sûr de ne pas avoir croisé une simple bribe de nuage. Les conditions de sorties (*ConditionOUT*) sont définies selon la même approche.

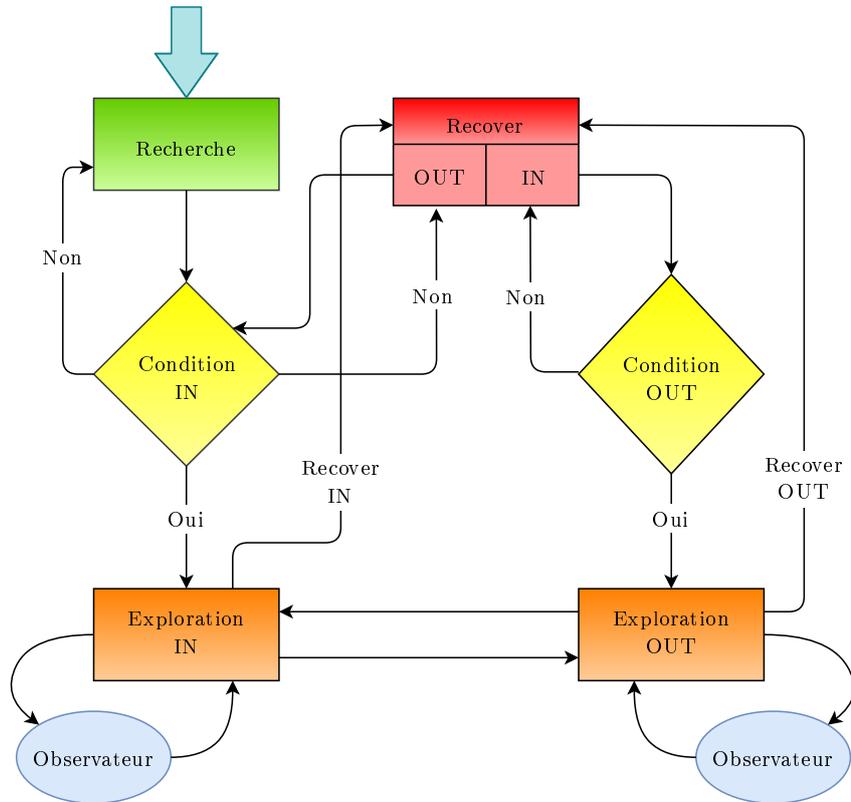


FIGURE 4.4 – Logigramme des schémas de vol adaptatifs

- Une fois le drone arrivé dans le nuage, la machine à états passe alors en fonctionnement nominal. Les actions du drone dans l'état *ExplorationIn* doivent lui permettre de sortir du nuage selon le schéma de vol adaptatif utilisé. L'état passera donc en *ExplorationOut*.
- Ces transitions entre les états *ExplorationIn* \leftrightarrow *ExplorationOut*, tout comme les transitions *ExplorationIn* \rightarrow *Recover* et *ExplorationOut* \rightarrow *Recover* sont réalisées par un observateur qui change l'état selon des conditions précises (détaillées lors de la présentation de l'algorithme).
- Le fonctionnement nominal de cette machine se résume avec ces deux états : *ExplorationIn*, le drone est dans le nuage et cherche à sortir puis *ExplorationOut*, le drone est sorti du nuage et cherche à y entrer de nouveau.
- Dans certaines configurations toutefois, il se peut que la trajectoire calculée et suivie par le drone le bloque dans ou en dehors du nuage. Dans ces deux cas, le drone passe alors dans l'état *Recover*. Selon l'état précédent son fonctionnement varie.
- Si le drone était enfermé dans le nuage, soit dans l'état précédent *ExplorationIn*, l'approche consiste à se servir du point de décollage du drone comme direction pour effectuer une ligne droite jusqu'à sortir de nouveau. Dès lors qu'il valide les *ConditionOUT* il reprend dans l'état *ExplorationOut*.

- En revanche, si le drone se retrouve bloqué en dehors du nuage (*ExplorationOut*), il utilise son dernier point de bordure détectée qui est mis à jour avec le vent relatif estimé pour effectuer un cercle d'un rayon variable pour retrouver le nuage et ainsi passer de nouveau en *ExplorationIn*.

Maintenant que le logigramme représentant le déroulement des actions réalisées pour un schéma de vol adaptatif a été présenté, l'algorithme est détaillé sous forme de pseudo-code. L'ensemble du code n'est pas commenté dans cette section, seules les variables et fonctions les plus intéressantes sont expliquées. Pour une meilleure compréhension le code est découpé en plusieurs parties. L'algorithme 1 présente la machine à état permettant de passer d'un bloc de code à un autre.

Algorithme 1 : Logigramme principal des schémas de vol adaptatifs

Entrées : Point A, vent_hori, vitesse_vert, rota_dir

```

1 in_nuage ← 0 ; // 0 dehors; 1 dedans
2 cibleWP ← A;
3 tps_LWC_IN ← 0;
4 tps_LWC_OUT ← 0;
5 changement_etat ← Vrai;
6 listeBordure ;
7 etat ← Recherche;
8 répéter
9   cibleWP ← MAJCibleWP(cibleWP, vent_hori);
10  suivant etat faire
11    cas où Recherche faire
12      |
13    cas où ExplorationIn faire
14      |
15      | observateur(etat, in_nuage, changement_etat);
16    cas où ExplorationOut faire
17      |
18      | observateur(etat, in_nuage, changement_etat);
19    cas où Recover faire
20      |
21  jusqu'à Changement schéma de navigation;
```

L'une des premières observations que l'on peut faire sur l'algorithme 1 porte sur les paramètres d'entrées de cette fonction. On retrouve bien l'ensemble des paramètres déjà discutés auparavant (*Point A*, *vent_hori*, *vitesse_vert*) ainsi qu'une variable nommée *rota_dir* qui sera expliquée par la suite. Les premières lignes qui composent ce code permettent de définir et d'associer des valeurs initiales aux va-

riables les plus importantes. Une fois le schéma lancé, le comportement du drone se répète en boucle tant que l'opérateur ne change pas l'élément de mission qu'il effectue. Cette boucle est composée en majeure partie d'une structure conditionnelle "switch case" reprenant les états du logigramme et d'une fonction *MAJCibleWP()* qui permet de mettre à jour les coordonnées du point ciblé avec le vent estimé. De la même façon que sur le logigramme, l'état commence par être initialisé en *Recherche* puis il transite entre différentes valeurs, exécutant différentes parties du code à chaque tour de boucle. Pour plus de clarté, l'ensemble du code a été découpé de sorte que chaque cas de la structure conditionnelle soit détaillée séparément.

Algorithme 2 : Algorithme de l'état *Recherche*

```

1 cas où Recherche faire
2   GoTo(cibleWP);
3   si DistanceToWP(cibleWP) < distance_min alors
4     si lwc > seuil_IN alors
5       si tps_LWC_IN > tps_min alors
6         in_nuage ← 1;
7         dernier_etat ← Recherche;
8         etat ← ExplorationIn;
9       sinon
10      tps_LWC_IN ← tps_LWC_IN + Δt ;

```

L'algorithme 2 correspond au code qui est exécuté lorsque l'on ajoute un nouvel élément de mission au drone. Tout d'abord, il exécute une action *GoTo()* avec comme paramètre le point cible présumé dans le nuage, ce qui guide le drone en ligne droite jusqu'à ce point. Pour passer à un autre état le drone doit valider un certain nombre de conditions. En priorité, il doit être assez proche de la cible pour éviter de passer dans un nuage non ciblé et de commencer l'exploration. Cela se traduit par la comparaison de la valeur renvoyée par la fonction *DistanceToWP()* et du paramètre *distance_min*. En second la détection d'un nuage doit être positive, il faut donc que la mesure du capteur de LWC après filtrage (*lwc*) soit supérieure au paramètre *seuil_IN* qui représente le seuil supérieur de l'hystérésis. Pour finir, le drone doit passer assez de temps dans le nuage se qui se traduit par un *tps_LWC_IN* supérieur au *tps_min*. Concernant ces deux derniers paramètres, ils sont exprimés en secondes et peuvent donc être ramenés à une distance par rapport à la vitesse de l'UAV. De plus, le *tps_min* est réglé en fonction des recommandations des scientifiques de l'atmosphère et des études préliminaires des données atmosphériques du site de collecte. Si le drone valide toutes les conditions il passe alors dans l'état *ExplorationIn*. Sinon, il continue à se diriger vers le point cible.

Les blocs de codes correspondants aux états *ExplorationIn* et *ExplorationOut* sont spécifiques au type de schéma adaptatif exécuté. Ils seront donc détaillés plus tard lors de l'explication des comportements de chaque schéma. Une fonction est

appelée à la fin de chacun de ces blocs : la fonction *observateur()* qui fait évoluer l'état courant en fonction des observations et des différents paramètres de filtrage.

L'algorithme 3 représentant l'observateur prend en entrée l'état actuel, la valeur binaire liée à la détection d'un nuage et finalement la variable *changement_etat* qui intervient dans les états de l'exploration. Cette fonction a deux conditions principales associées à l'état. Si le drone est dans le nuage, l'observateur a pour rôle de faire passer l'état de *ExplorationIn* → *ExplorationOut* ou *ExplorationIn* → *Recover* sous certaines conditions. Pour passer à *ExplorationOut*, il faut que la valeur du LWC soit en dessous du *seuil_OUT*, correspondant au seuil inférieur de l'hystérésis, et que le temps passé en dehors du nuage (*tps_LWC_OUT*) soit supérieur au *tps_min* de transition. Dans le cas où la valeur du LWC n'est pas inférieure au seuil de sortie, l'observateur compare alors le temps passé dans le nuage (*tps_LWC_IN*) avec le *tps_max*, représentant le temps maximum a passé dans un état avant de déclarer que le drone est perdu. Il a été ajouté à la suite de nombreuses observations en simulation et lors d'expérimentations dans lesquelles le drone entrait dans un nuage mais ne ressortait pas tout seul avec les fonctions appelées dans l'état *ExplorationIn*. Ainsi, après un temps suffisant pour réaliser les actions nécessaires pour sortir normalement du nuage, l'observateur bascule l'état en *Recover*. Si le drone est en dehors du nuage, il modifie l'état de *ExplorationOut* → *ExplorationIn* ou *ExplorationOut* → *Recover*. Les comparaisons réalisées et les conditions de passage vers un autre état sont sensiblement les mêmes que celles expliquées précédemment mais avec des seuils et des variables différentes.

Avec le développement du cumulus et la mise à jour du point cible, il est possible que le drone se retrouve à tourner trop longtemps dans ou en dehors du nuage. Le principe de l'algorithme 4 est de se servir des données enregistrées précédemment pour que le drone change d'état rapidement.

Dans le cas où le drone reste dans l'état *ExplorationIn* trop longtemps, l'algorithme va diriger le drone en ligne droite avec la fonction *GoTo()* jusqu'à un point appelé *Home* qui correspond à son point de décollage mais avec l'altitude courante du drone. S'il traverse le nuage, la valeur du LWC est inférieure au *seuil_OUT* pendant un temps suffisant, on peut considérer qu'il est de nouveau hors du nuage et que l'état peut passer à *ExplorationOut*.

En revanche, si le drone est bloqué dans l'état *ExplorationOut*, l'algorithme va guider le drone sur un cercle dont le centre correspond au dernier point de bordure. Le rayon de ce cercle *R_recover* variant au cours du temps permettra ainsi de recroiser le nuage. On peut remarquer que le dernier point sauvegardé de la frontière est mis à jour avec la fonction *MAJBordureRécente()*.

En conclusion, on notera que le choix des paramètres joue un rôle majeur dans le déroulement de ces nouvelles fonctions de navigation. Par exemple, si l'estimation du vent est trop éloignée du vent réel alors le drone sera guidé vers une trajectoire qui s'adaptera très mal au nuage. Il en est de même pour le réglage des seuils qui correspond pour le moment à la seule méthode de détection, essentielle au bon fonctionnement du système. C'est pour ces problèmes que la stratégie de récupération est importante.

Algorithme 3 : Algorithme décrivant la fonction de l'observateur

Entrées : *etat*, *in_nuage*, *changement_etat*, *dernier_etat*

```

1 Fonction observateur(etat, in_nuage, changement_etat, dernier_etat) :
2   si etat == ExplorationIn alors
3     si lwc < seuil_OUT alors
4       si tps_LWC_OUT > tps_min alors
5         in_nuage ← 0;
6         changement_etat ← Vrai;
7         dernier_etat ← ExplorationIn;
8         etat ← ExplorationOut;
9       sinon
10        tps_LWC_OUT ← tps_LWC_OUT +  $\Delta t$  ;
11     sinon si lwc > seuil_OUT alors
12       si tps_LWC_IN > tps_max alors
13         changement_etat ← Vrai;
14         dernier_etat ← ExplorationIn;
15         etat ← Recover;
16       sinon
17        tps_LWC_IN ← tps_LWC_IN +  $\Delta t$  ;
18     sinon si etat == ExplorationOut alors
19       si lwc > seuil_IN alors
20         si tps_LWC_IN > tps_min alors
21           in_nuage ← 1;
22           changement_etat ← Vrai;
23           dernier_etat ← ExplorationOut;
24           etat ← ExplorationIn;
25         sinon
26          tps_LWC_IN ← tps_LWC_IN +  $\Delta t$  ;
27     sinon si lwc < seuil_IN alors
28       si tps_LWC_OUT > tps_max alors
29         changement_etat ← Vrai;
30         dernier_etat ← ExplorationOut;
31         etat ← Recover
32       sinon
33        tps_LWC_OUT ← tps_LWC_OUT +  $\Delta t$  ;

```

Algorithme 4 : Algorithme de l'état *Recover*

```

1 cas où Recover faire
2   si dernier_etat == ExplorationIn alors
3     GoTo(home);
4     si lwc < seuil_OUT alors
5       si tps_LWC_OUT > tps_min alors
6         in_nuage ← 0;
7         dernier_etat ← Recover;
8         etat ← ExplorationOut;
9       sinon
10        tps_LWC_IN ← tps_LWC_IN + Δt ;
11  sinon si dernier_etat == ExplorationOut alors
12    Cercle(BordureRecente, R_recover, rota_cercle, vitesse_vert);
13    si lwc > seuil_IN alors
14      si tps_LWC_IN > tps_min alors
15        in_nuage ← 1;
16        dernier_etat ← Recover;
17        etat ← ExplorationIn;
18      sinon
19        tps_LWC_OUT ← tps_LWC_OUT + Δt ;
20    BordureRecente ← MAJBordureRecente(BordureRecente, vent_hori);
21    R_recover ← MAJRayonRecover(R_recover);

```

Les sections suivantes présentent en détails les spécificités de chacun des schémas adaptatifs.

4.2.1 Le Lace

Le schéma adaptatif *Lace* est inspiré des travaux de [Sinha 2009] et de [Saldana 2017] qui développent une méthode pour estimer les limites d'un environnement dynamique avec une équipe de robots. Dans cet article, ils prouvent qu'avec un essaim de plusieurs agents il est possible de collecter des données, de les communiquer aux autres et d'effectuer les calculs nécessaires pour estimer la frontière. Une partie intéressante de leur travail réside dans la validation d'une architecture distribuée dans laquelle la partie traitement est partagée et où une équipe de robots travaillent de manière coopérative.

Ce premier schéma a été imaginé après de nombreuses discussions permettant de déterminer les besoins des météorologues. L'une des zones à cartographier correspond à la frontière du nuage avec son environnement ambiant. Pour étendre l'exploration au volume 3D du nuage, une vitesse verticale supplémentaire peut être spécifiée selon les besoins des opérateurs. Cependant, naviguer sur la bordure d'un nuage nécessite quelques précautions. Premièrement, cette frontière n'est pas nette et sa détection nécessite un filtrage comme expliqué dans la section 4.1.4. Deuxièmement, les scientifiques de l'atmosphère souhaitent comprendre les échanges existants entre le nuage et son environnement. L'étude de la frontière est donc primordiale et il ne s'agit pas de collecter des données à l'emplacement exact de la bordure du nuage mais plutôt de naviguer selon une trajectoire adaptée qui couvre une distance suffisante autour de la frontière.

Pour mieux comprendre le comportement des drones lors des différents schémas adaptatifs d'exploration, des illustrations schématiques sont présentées. La forme du nuage est affichée en **noir**, le drone est représenté en **orange**, la trajectoire théorique en **vert**, les points et les cercles calculés en **bleu** et enfin, les paramètres en **rouge**.

Avant de détailler plus en profondeur les blocs de code *ExplorationIn* et *ExplorationOut* du schéma adaptatif *Lace*, le résultat de l'algorithme, soit la trajectoire théorique réalisée et le comportement du drone à chaque étape est expliqué avec la figure 4.5. L'illustration présentée peut être décrite comme la superposition de plusieurs schémas pris à différents instants de l'exploration du nuage. L'image présente donc la trajectoire d'un seul et unique drone.

Pour commencer, le schéma est initialisé avec en paramètre un point 3D cible (point en **rouge**) estimé à l'intérieur du nuage. Le drone se dirige alors en direction de ce point en ligne droite. À chaque fois que le drone estime avoir traversé la frontière du nuage il récupère sa position et son cap (flèches **violettes** sur la Fig. 4.5) afin de calculer un prochain centre de cercle (point et cercle en **bleu**). Ce point est calculé en fonction d'un rayon de cercle correspondant au rayon de braquage minimum du drone R_{min} (trait en **vert clair**) et d'un angle fixé à $\pm \frac{\pi}{2}$ (en **gris**) qui change selon le paramètre initial *rota_dir* et l'état actuel. En d'autres termes, au déclenchement du schéma, l'opérateur choisit de quel côté le drone doit réaliser

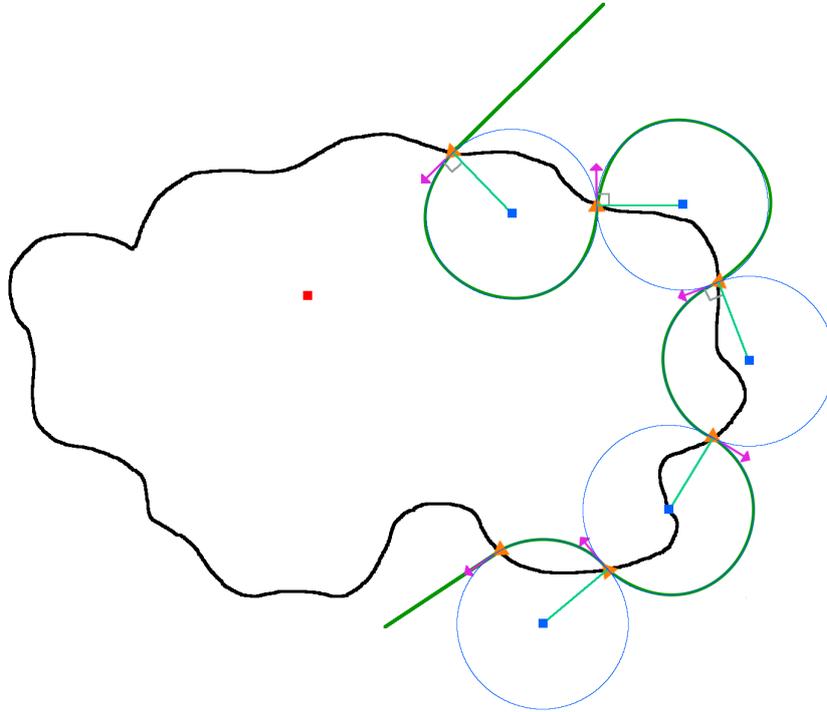


FIGURE 4.5 – Trajectoire du schéma adaptatif Lace

son premier virage dans le nuage, définissant alors l'angle de calcul (à droite $-\frac{\pi}{2}$ et à gauche $+\frac{\pi}{2}$) mais également le sens de rotation lors de l'exécution du cercle (à droite sens horaire et à gauche sens anti-horaire). Par la suite, à chaque fois que le drone traverse la frontière, il change son sens de calcul du prochain centre de cercle et son sens de rotation. De la sorte, le drone est guidé à travers la frontière du nuage pour effectuer des "entrées-sorties" dans le nuage tout en s'adaptant à la forme de ce dernier. L'objectif est de collecter un grand nombre de points sur une bande le long de la frontière tout en faisant rapidement le tour du nuage afin d'estimer au mieux sa forme extérieure et les interactions microphysiques existantes dans cette zone.

L'algorithme 5 décrit la stratégie d'exploration. Les codes déroulés dans les états *ExplorationIn* et *ExplorationOut* sont exactement les mêmes. Si le drone entre pour la première fois dans ce mode, il commence par récupérer sa position, l'ajoute à la liste des points de la bordure enregistrée et finalement sauvegarde cette position dans une variable appelée *BordureRecente*. Ensuite il initialise à nouveau les variables correspondantes au temps passé dans et en dehors du nuage. Avant de commencer les calculs, il récupère enfin la direction dans laquelle il est dirigé avec la fonction *ReleverDirection* et l'attribut dans la variable *dir_uav*. Le premier calcul à réaliser consiste à déterminer dans quel sens le drone doit réaliser son prochain cercle et donc de quel côté le centre du prochain cercle doit être calculé. Les deux fonctions appelées

Algorithme 5 : Algorithme de l'état *ExplorationIn* et de l'état *ExplorationOut* pour le schéma *Lace*

```

1 cas où ExplorationIn faire
2   si changement_etat == Vrai alors
3     PosActu ← ReleverPosition();
4     listeBordure.ajouter(PosActu);
5     BordureRecente ← PosActu ;
6     tps_LWC_IN ← 0;
7     tps_LWC_OUT ← 0;
8     dir_uav ← ReleverDirection();
9     rota_cercle ← CalculerSensRotation(cibleWP, vent_hori,
    rota_dir);
10    dir_cercle ← CalculerDirection(cibleWP, vent_hori, rota_dir);
11    CentreCercleWP ← CalculerProchainCentreCercle(PosActu,
    dir_uav, dir_cercle);
12    rota_dir ← InverserSens(rota_dir);
13    changement_etat ← Faux;
14  sinon
15    BordureRecente ← MAJBordureRecente(BordureRecente, vent_hori);
16    CentreCercleWP ← MAJCentreCercle(CentreCercleWP, vent_hori);
17  Cercle(CentreCercleWP,  $R_{min}$ , rota_cercle, vitesse_vert);
18  observateur(etat, in_nuage, changement_etat, dernier_etat);

```

Algorithme 6 : Algorithme décrivant la fonction de calcul du prochain centre de cercle

```

Entrées : PosActu, dir_uav, dir_cercle
Sorties : CentreCercleWP
1 Fonction CalculerProchainCentreCercle(PosActu, dir_uav, dir_cercle) :
2   si dir_cercle == Droite alors
3     angle_rotation ←  $-\frac{\pi}{2}$ ;
4     rota_dir ← Gauche;
5   sinon
6     angle_rotation ←  $\frac{\pi}{2}$ ;
7     rota_dir ← Droite;
8   CentreCercleWP_X ← PosActu_X
    + cos(angle_rotation + dir_uav) ×  $R_{min}$ ;
9   CentreCercleWP_Y ← PosActu_Y
    + sin(angle_rotation + dir_uav) ×  $R_{min}$ ;
10  CentreCercleWP_Z ← PosActu_Z;
11  retourner CentreCercleWP

```

ont normalement besoin d'un seul paramètre *rota_dir* et de l'état actuel. Toutefois, il est possible de déterminer le premier sens de rotation simplement avec le point ciblé et le vent relatif estimé. Cette approche n'étant pas encore totalement développée, elle est discutée dans la partie "perspectives" de ce rapport. Finalement, le prochain centre de cercle est calculé avec la fonction *CalculerProchainCentreCercle()* qui se sert des résultats des deux fonctions précédentes (voir algorithme 6). La fin de cette condition permet d'inverser le sens de calcul et de rotation des cercles et de changer la variable *ChangementEtat*.

Si le drone a déjà réalisé ces calculs alors la condition exécute deux fonctions qui permettent de mettre à jour la sauvegarde du dernier point de bordure enregistré et le centre du cercle qui est en train d'être réalisé, avec le vent relatif apporté en paramètre.

Dans tous les cas, deux fonctions principales sont appelées : la fonction qui guide le drone sur un cercle avec un certain point en tant que centre, une distance servant de rayon, un sens de rotation et une vitesse verticale ; et la fonction de l'observateur qui permet de changer d'état si les conditions de transition sont validées.

Pour conclure sur la présentation de ce schéma adaptatif, les besoins des scientifiques de l'atmosphère en termes de mesures diverses autour de la frontière du nuage ont poussé le développement de cette stratégie d'exploration qui consiste à réaliser des "entrées-sorties" dans le nuage à l'aide des mesures de LWC. Bien qu'en théorie, validée sur les simulations statiques, l'utilisation de cette fonction est très efficace, en pratique elle s'avère plus complexe à employer et a tendance à perdre le suivi du nuage. Le principal problème de cette stratégie provient de la taille des cercles qu'il est possible de réaliser. En effet, étant donné que le drone effectue des cercles d'un certain rayon au niveau de la frontière du nuage, la valeur du rayon impacte directement les mesures. Un exemple tout simple est le suivant : un drone explore un nuage d'un rayon de 300 mètres et son rayon de braquage minimum est de 100 mètres. Il croise approximativement six fois la frontière du nuage. Cependant dans le cas où le nuage fait seulement 100 mètres de rayon, le rayon de braquage du drone ne change pas empêchant alors la stratégie de s'appliquer correctement. La taille du nuage ainsi que le rayon de braquage minimum du drone impactent donc directement le bon déroulement de cette stratégie d'exploration adaptative.

4.2.2 Le Trinity

Le schéma adaptatif *Trinity* a été développé en dernier sur le terrain après avoir observé plusieurs fois que le schéma *Lace* ne permettait pas le suivi des petits nuages. Son nom vient du *Nœud de la trinité* puisque les trajectoires réalisées se rapprochent de ce symbole celtique. Ce schéma a pour but de compléter le *Lace* dans la collecte de mesures au niveau de la zone de bordure d'un nuage. Le comportement de cette fonction de navigation est très similaire au fonctionnement du *Lace*. Seules quelques variations existent.

La Figure 4.6 illustre la trajectoire d'un drone exécutant un motif *Trinity*. À gauche, on retrouve l'exécution de cette stratégie sur un nuage de taille relativement

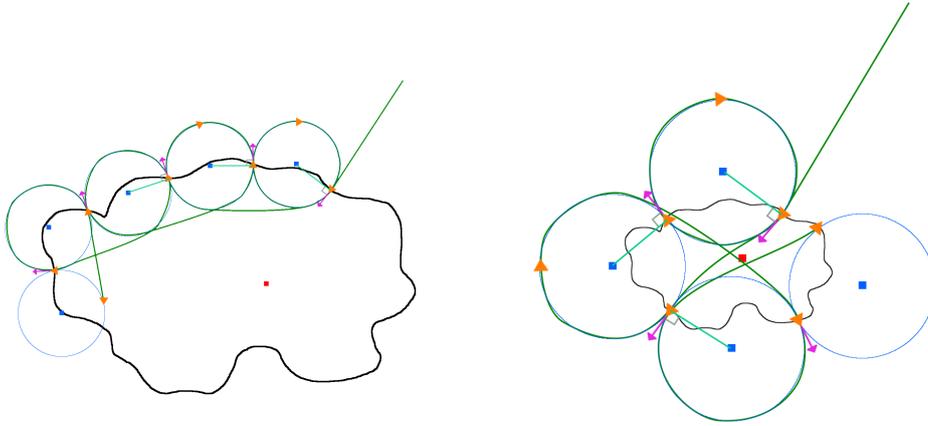


FIGURE 4.6 – Trajectoire du schéma adaptatif Trinity explorant un gros nuage à gauche et un petit à droite.

importante et à droite sur un nuage plus petit. Pour bien comprendre le comportement du drone en fonction de la taille du nuage, les cercles calculés (en **bleu**) sont identiques en taille à gauche et à droite sur le schéma, même si l'échelle de l'illustration change. Lorsque le drone entre pour la première fois dans le nuage, il effectue les mêmes calculs que pour le *Lace*, à savoir : récupérer sa position et sa direction puis calculer le prochain centre de cercle en fonction du paramètre *rota_dir*. Dans le cas où le premier virage doit se faire à droite, le drone calcule le prochain cercle de ce côté puis il navigue sur ce cercle en sens horaire. Par la suite, les entrées dans le nuage ne déclenchent plus aucun comportement. C'est seulement lors d'une sortie du nuage que le drone calcule un prochain centre de cercle du côté opposé à l'initial (à gauche) puis est guidé sur ce cercle toujours dans un sens de rotation horaire. Cette stratégie permet principalement de forcer le drone à suivre une trajectoire comportant des virages tout en s'assurant de la présence du nuage.

L'algorithme 7 présente le bloc de code lorsque le drone entre dans l'état *ExplorationIn* dans le cas de l'exécution d'un schéma adaptatif *Trinity*. On peut voir qu'une première variable nommée *init* est ajoutée au début de l'algorithme, décrivant la première fois que le drone entre dans le nuage. À cet instant précis, le drone effectue les opérations classiques (récupération et sauvegarde de la position actuelle, réinitialisation des variables de temps et récupération de la direction), il définit ensuite son sens de calcul et de rotation du prochain cercle puis finit par calculer le prochain centre de cercle. Pour terminer, il inverse la variable *rota_dir* et donne aux variables *init* et *ChangementEtat* la valeur "Faux", pour éviter de retourner dans les blocs de conditions associées. Si le drone entre de nouveau dans le nuage (donc que *ChangementEtat* est vrai mais *Init* faux), le drone effectue les opérations classiques, change la variable *ChangementEtat* puis finit par mettre à jour le dernier point de centre de cercle calculé. En d'autres termes le drone ne change pas son comportement lorsqu'il entre de nouveau dans le nuage ciblé, il ne fait que suivre la

Algorithme 7 : Algorithme de l'état *ExplorationIn* pour le schéma *Trinity*

```

1  init ← Vrai;
2  :
3  cas où ExplorationIn faire
4  | si init == Vrai alors
5  |   PosActu ← ReleverPosition();
6  |   listeBordure.ajouter(PosActu);
7  |   BordureRecente ← PosActu ;
8  |   tps_LWC_IN ← 0;
9  |   tps_LWC_OUT ← 0;
10 |   dir_uav ← ReleverDirection();
11 |   rota_cercle ← CalculerSensRotation(cibleWP, vent_hori,
12 |   |   rota_dir);
13 |   dir_cercle ← CalculerDirection(cibleWP, vent_hori, rota_dir);
14 |   CentreCercleWP ← CalculerProchainCentreCercle(dir_uav,
15 |   |   dir_cercle);
16 |   rota_dir ← InverserSens(rota_dir);
17 |   init ← Faux;
18 |   changement_etat ← Faux;
19 | sinon si changement_etat == Vrai alors
20 |   PosActu ← ReleverPosition();
21 |   listeBordure.ajouter(PosActu);
22 |   BordureRecente ← PosActu ;
23 |   tps_LWC_IN ← 0;
24 |   tps_LWC_OUT ← 0;
25 |   dir_uav ← ReleverDirection();
26 |   changement_etat ← Faux;
27 |   CentreCercleWP ← MAJCentreCercle(CentreCercleWP, vent_hori);
28 | sinon
29 |   BordureRecente ← MAJBordureRecente(BordureRecente, vent_hori);
30 |   CentreCercleWP ← MAJCentreCercle(CentreCercleWP, vent_hori);
31 Cercle(CentreCercleWP,  $R_{min}$ , rota_cercle, vitesse_vert);
32 observateur(etat, in_nuage, changement_etat);

```

trajectoire du dernier cercle calculé. La fin du code est la même que les cas d'exploration déjà expliqués dans le cadre du *Lace*. La principale différence que l'on peut observer avec le schéma *Lace* est que la trajectoire générée par cette fonction de navigation sera plus longue et donc que le *Trinity* mettra plus de temps pour faire un tour du nuage.

Algorithme 8 : Algorithme de l'état *ExplorationOut* pour le schéma *Trinity*

```

1 cas où ExplorationOut faire
2   si changement_etat == Vrai alors
3     PosActu ← ReleverPosition();
4     listeBordure.ajouter(PosActu);
5     BordureRecente ← PosActu ;
6     tps_LWC_IN ← 0;
7     tps_LWC_OUT ← 0;
8     dir_uav ← ReleverDirection();
9     dir_cercle ← CalculerDirection(cibleWP, vent_hori, rota_dir);
10    CentreCercleWP ← CalculerProchainCentreCercle(dir_uav,
11           dir_cercle);
12    changement_etat ← Faux;
13  sinon
14    BordureRecente ← MAJBordureRecente(BordureRecente, vent_hori);
15    CentreCercleWP ← MAJCentreCercle(CentreCercleWP, vent_hori);
16    Cercle(CentreCercleWP,  $R_{min}$ , rota_cercle, vitesse_vert);
17    observateur(etat, in_nuage, changement_etat);

```

L'algorithme 8 présente le bloc de code pour la partie *ExplorationOut* du schéma adaptatif *Trinity*. On retrouve la même disposition qu'auparavant avec seulement quelques changements. La principale différence réside dans le fait qu'après avoir effectué les opérations classiques, le drone calcule seulement la direction du prochain centre de cercle (*dir_cercle*), sachant que le sens de calcul a changé uniquement lors de la première entrée dans le nuage. Dans le cas présenté avec les illustrations, cela veut dire que lors de la première entrée, le sens de rotation est réglé en sens horaire et le calcul du prochain point de cercle à $-\frac{\pi}{2}$ (à droite). Une fois entré, le sens de rotation (*rota_cercle*) reste le même et le prochain centre de cercle est calculé avec $+\frac{\pi}{2}$ (à gauche). Ces variables resteront inchangées pendant la totalité de l'exécution du schéma. Ici, à la différence de l'état *ExplorationIn*, le bloc *ChangementEtat == Vrai* se termine par un nouveau calcul de centre de cercle.

Pour pallier les différents problèmes observés avec le schéma *Lace*, le *Trinity* apporte des changements en termes de sens de calcul et de rotation. Tourner toujours dans le même sens et calculer le centre de cercle du côté opposé force le drone à réaliser des demi-tours et revenir de la sorte dans le nuage. En plus de permettre

l'exploration de petits nuages, cela permet de réduire le temps en dehors du nuage et le suivi du nuage est ainsi nettement amélioré.

4.2.3 Le Rosette

Les schémas adaptatifs *Lace* et *Trinity* ont comme objectif de récolter des mesures aux alentours de la frontière du nuage. Avec ces mesures, il est possible de cartographier et de modéliser la forme du nuage et son évolution dans le temps. Mais explorer un nuage seulement au niveau de sa bordure avec son environnement n'est pas suffisant pour identifier tous les échanges microphysiques qui se mettent en place lors de sa croissance. L'objectif de ce schéma adaptatif est de collecter des données à la fois à l'intérieur du nuage et à sa bordure à une altitude fixe. Le mot *Rosette* signifie rosace en anglais. Ce motif tire son nom de sa forme très similaire à ces formes géométriques.

Pour les scientifiques de l'atmosphère, cette fonction de navigation à un double intérêt. Exécuter le schéma *Rosette* avec un seul drone permet d'échantillonner l'intérieur du nuage en maximisant la collecte au niveau du cœur du nuage tout en conservant une exploration de la bordure. La collecte de mesures sur tout un plan 2D horizontal permet ensuite aux scientifiques de traiter les données et de reconstruire des tranches du nuage. Déployer ce schéma sur deux drones à différentes altitudes devient encore plus intéressant puisque cela offre la possibilité aux météorologues de reconstruire deux tranches du nuage et ainsi de calculer en post-traitement le flux vertical évoluant dans le nuage entre ces deux altitudes.

La Figure 4.7 illustre différents moments de l'exécution du schéma adaptatif *Rosette*. Il est initialisé de la même façon que les autres avec un point cible, un rayon de cercle et un sens de calcul/rotation. Lorsque le drone entre dans le nuage pour la première fois, il continue de se diriger au delà du point cible. Il est guidé sur une trajectoire linéaire définie par le point d'entrée et le point cible jusqu'à la sortie du nuage. Une fois en dehors, il calcule un prochain centre de cercle et suit la trajectoire dans le sens de rotation imposé. Lorsqu'il entre de nouveau dans le nuage, le drone calcule alors un nouveau point cible (en **rouge**) et navigue dans sa direction jusqu'à sortir de nouveau.

Le point cible est déterminé à bord par un calcul de barycentre avec les points de bordure sauvegardés. Toutefois ce calcul peut être réalisé par le système de cartographie de la station sol. Le drone se contente alors de recevoir un nouveau point cible. Par exemple le système de cartographie peut utiliser des processus bien plus complexes qu'un simple barycentre pour déterminer le centre estimé du nuage. Notamment en fusionnant les mesures continues des vents verticaux, de la température, de la pression et autres pour construire une carte plus dense qu'avec les points de la bordure. Cette méthode permet notamment de maximiser la collecte de mesures en guidant le drone au cœur du nuage et non au centre géométrique.

En répétant ces grandes traversées du nuage, ce schéma adaptatif ajuste au fur et mesure le point du centre du nuage et collecte ainsi de précieuses données sur la totalité de la surface d'une couche du nuage. Sur la dernière image de cette figure

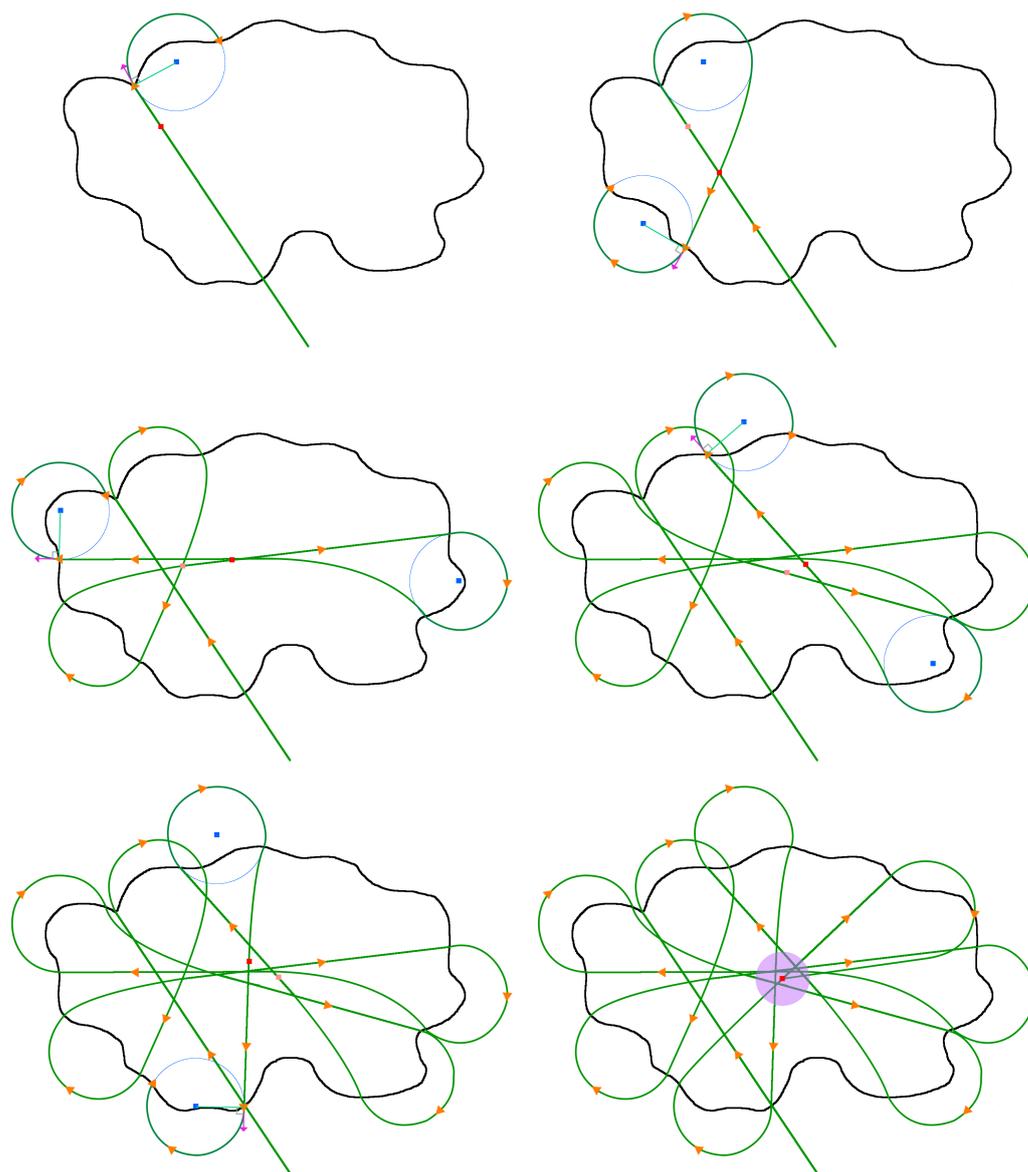


FIGURE 4.7 – Trajectoire du schéma adaptatif *Rosette* à différents stades de l'exploration d'un nuage

(en bas à droite), on peut voir le cœur estimé du nuage (en **violet**).

Algorithme 9 : Algorithme de l'état *ExplorationIn* pour le schéma *Rosette*

```

1 centre_nuage ← cibleWP ;
2 cas où ExplorationIn faire
3   si changement_etat == Vrai alors
4     PosActu ← ReleverPosition();
5     listeBordure.ajouter(PosActu);
6     BordureRecente ← PosActu ;
7     tps_LWC_IN ← 0;
8     tps_LWC_OUT ← 0;
9     centre_nuage ← CalculCoeurNuage(centre_nuage, listeBordure);
10    changement_etat ← Faux;
11  sinon
12    BordureRecente ← MAJBordureRecente(BordureRecente, vent_hori);
13    centre_nuage ← MAJCentreNuage(centre_nuage, vent_hori);
14  Segment(centre_nuage);
15  observateur(etat, in_nuage, changement_etat);

```

L'algorithme 9 présente le pseudo code du cas *ExplorationIn*, permettant d'obtenir des traversées du nuage. On y retrouve les fonctions déjà discutées et des nouveautés. La variable *centre_nuage* est d'abord initialisée avec les coordonnées du point cible. Cette variable change ensuite de valeur à chaque nouvelle entrée dans le nuage avec la fonction *CalculCoeurNuage()* qui par défaut calcule le barycentre ou utilise le résultat provenant de la cartographie. Le point estimé du cœur du nuage est alors mis à jour avec la fonction *MAJCentreNuage()*. On peut remarquer qu'à la fin du code, la fonction de navigation *Segment()* est configurée pour diriger le drone sur une ligne droite infinie plutôt que jusqu'à un point donné.

L'algorithme 10 présente le bloc de code correspondant à l'état *ExplorationOut* du schéma adaptatif *Rosette*. Ce dernier bloc est très similaire à ceux du *Lace*. Deux changements sont à noter. Tout d'abord, le sens de rotation et la direction de calcul du prochain cercle n'est pas changé. Le drone tourne toujours dans la même direction tout au long de l'exécution de cette fonction. Ensuite, la fonction de mise à jour du cœur du nuage est ajoutée au bloc de condition pour le garder à jour.

Bien que le déroulement de cette fonction de navigation soit simple à mettre en place, son utilisation reste plus complexe, principalement à cause de la difficulté à estimer les coordonnées du cœur du nuage. Selon le processus et la façon dont le calcul est réalisé (utilisation des points de bordure ou fusion de données), l'exploration du drone est plus ou moins efficace. Un mauvais choix sur la fonction de calcul peut conduire à la perte de suivi du nuage.

Algorithme 10 : Algorithme de l'état *ExplorationOut* pour le schéma *Rosette*

```

1 cas où ExplorationOut faire
2   si changement_etat == Vrai alors
3     PosActu ← ReleverPosition();
4     listeBordure.ajouter(PosActu);
5     BordureRecente ← PosActu ;
6     tps_LWC_IN ← 0;
7     tps_LWC_OUT ← 0;
8     dir_uav ← ReleverDirection();
9     rota_cercle ← CalculerSensRotation(cibleWP, vent_hori,
    rota_dir);
10    dir_cercle ← CalculerDirection(cibleWP, vent_hori, rota_dir);
11    CentreCercleWP ← CalculerProchainCentreCercle(dir_uav,
    dir_cercle);
12    changement_etat ← Faux;
13  sinon
14    BordureRecente ← MAJBordureRecente(BordureRecente, vent_hori);
15    centre_nuage ← MAJCentreNuage(centre_nuage, vent_hori);
16    CentreCercleWP ← MAJCentreCercle(CentreCercleWP, vent_hori);
17  Cercle(CentreCercleWP,  $R_{min}$ , rota_cercle, vitesse_vert);
18  observateur(etat, in_nuage, changement_etat);

```

4.2.4 Spirale conique oblique

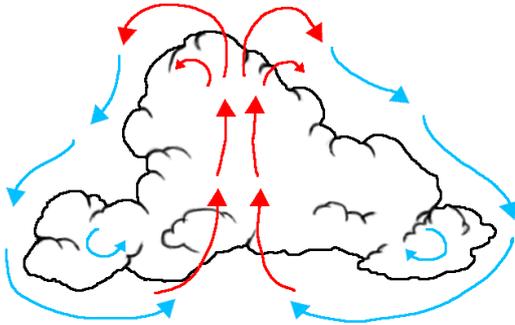


FIGURE 4.8 – Vent vertical circulant dans un nuage cumulus. En rouge des vents chaud et ascendant; en bleu des vents froid et descendant

ascendant à l'intérieur, alors qu'au niveau de la frontière à l'extérieur il s'agit d'un vent descendant (comme l'illustre la Figure 4.8). Le principe est donc de se servir des mesures du vent vertical une fois à l'intérieur pour chercher à atteindre une zone où les valeurs sont les plus fortes.

Ce dernier schéma de vol adaptatif n'a pas été complètement développé. En effet seulement une implémentation d'un schéma de vol géométrique a été mise en place et la partie adaptative n'a pas pu être ajoutée par manque de temps. La stratégie d'adaptation a été imaginée afin que le drone soit guidé pour réaliser une spirale dans le cœur du nuage. Les mesures qui peuvent être réalisées dans la colonne centrale du nuage permettraient aux météorologues de mieux comprendre son cycle de vie et amélioreraient grandement sa modalisation. Une des caractéristiques d'un nuage est la présence d'un vent vertical

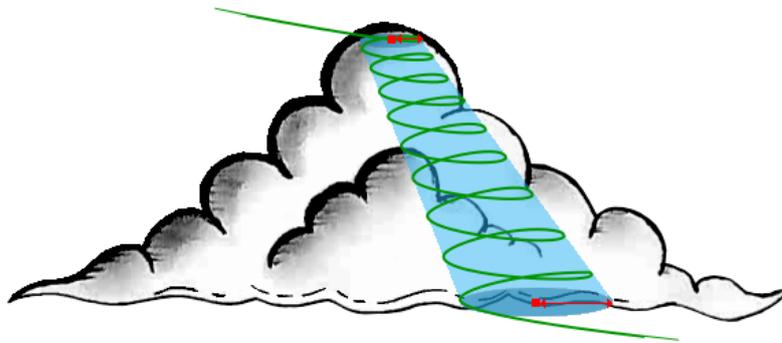


FIGURE 4.9 – Trajectoire du schéma géométrique *Spirale conique*

Au commencement, l'idée était de définir un schéma de vol géométrique capable de réaliser des montées et descentes à l'intérieur du nuage. Les météorologues ont estimé que la colonne de vent au centre du nuage devrait avoir une forme de cône oblique. En effet, le diamètre du cœur à la base du nuage est plus grand qu'au sommet et les positions des centres sont certainement différentes. La Figure 4.9 illustre la trajectoire qui peut être empruntée avec le schéma de vol *Spirale conique*. Le principe est de définir deux centres de cercle avec des coordonnées, des altitudes et des rayons différents. Le drone peut suivre la trajectoire d'un cercle avec une composante verticale supplémentaire. Le rayon et les coordonnées du cercle varient

en fonction de l'altitude courante pour réaliser une forme de spirale autour du cône dont la ligne centrale se décale pour correspondre au mieux au centre du nuage.

Dans de futurs travaux, ce schéma pourrait être amélioré de façon à utiliser diverses mesures telles que le vent vertical, la valeur de *LWC*, ... pour s'adapter à la forme exacte du centre du nuage et réaliser une cartographie efficace d'un profil vertical de cumulus. De nombreux travaux portant sur la recherche de sources d'ascendances thermiques et leur utilisation pour conserver l'énergie sont déjà existants dans le domaine des drones. Cette littérature servira de ligne directrice dans l'adaptation des méthodes existantes pour l'exploration des nuages [[Langelaan 2007](#), [Chakrabarty 2010](#), [Cobano 2013](#), [Bonnin 2015](#)].

Résultats

Contents

5.1 Validation des schémas adaptatifs avec des simulations . . .	75
5.1.1 Établissement d'un simulateur global	76
5.1.2 Les résultats des motifs de navigation en simulation	77
5.1.3 Simulations hybrides	100
5.2 Campagne de vols expérimentales à la Barbade	103
5.2.1 Contexte	103
5.2.2 Déroulement d'une opération de vol typique	106
5.2.3 Données collectées et trajectoires résultantes des motifs de vol adaptatifs	108
5.2.4 Résumé de la campagne	119
5.2.5 Les améliorations post-campagne	121

Ce chapitre a pour objectif d'exposer les résultats des schémas de vol adaptatifs. La première section présente la méthode utilisée pour valider le comportement des schémas de vol développés. Elle expose notamment l'approche choisie pour construire un simulateur global puis montre et analyse les trajectoires résultantes des stratégies d'exploration adaptatives sur des environnements statiques, dynamiques et pour finir hybrides. La seconde section détaille la mise en place et les résultats des vols adaptatifs réalisés pendant la campagne à la Barbade avec le projet NE-PHELAE. Cette section prouve l'utilité des schémas implémentés pendant cette thèse dans l'exploration et la collecte de données dans un nuage. De plus elle met en lumière plusieurs problèmes rencontrés pendant ces vols expérimentaux. Pour finir, une section est dédiée à la présentation des diverses améliorations possibles sur les schémas de vol adaptatifs suite aux observations faites sur ces derniers pendant la campagne de vol. Ce perfectionnement dans les stratégies d'exploration est notamment validé à travers différents scénarios.

5.1 Validation des schémas adaptatifs avec des simulations

Développer de nouvelles méthodes de navigation pour un drone autonome passe obligatoirement par une phase de simulation. En effet, même si les auto-pilotes sont

en charge de la stabilité et du guidage des drones, implémenter de nouvelles approches pour se déplacer dans l'espace peut très vite conduire à des erreurs inattendues pouvant causer des bugs logiciels et dans le pire des cas le crash du drone. Afin d'éviter ces problèmes, les schémas de vol adaptatifs sont validés progressivement dans un environnement de plus en plus réaliste.

5.1.1 Établissement d'un simulateur global

La première étape consiste à construire un environnement de simulation au plus proche de la réalité. L'idée est donc de simuler à la fois un drone autonome évoluant dans un environnement en 3D et d'y incruster des données correspondant à des nuages.

5.1.1.1 Simulation de l'avion

La suite logiciel **PPRZ** permet déjà de réaliser des simulations de drones. Ces dernières utilisent notamment la bibliothèque logicielle **JSBSIM** qui modélise la dynamique de vol d'un avion de modélisme pour se rapprocher au mieux du vrai comportement d'un drone dans la réalité. **PPRZ** intègre également un grand nombre d'outils logiciels permettant par exemple d'appliquer un certain vent au drone, d'accélérer le temps de la simulation ou encore d'enregistrer différentes variables pendant le vol. L'utilisation de l'ensemble de cette architecture donne lieu à des simulations de drones autonomes dans un environnement 3D respectant les contraintes aérodynamiques et de vent présent dans le vrai monde. De plus, l'existence de différents fichiers de configurations permet de changer toutes les caractéristiques du drone afin qu'elles correspondent au maximum au drone utilisé (vitesse de vol, angle de roulis et d'incidence maximal, coefficient du PID, ...). Pour finir, la mise en place de simulations permet de faire différents tests sur le plan de vol et la façon dont la mission doit être réalisée avant de déployer réellement le drone sur le terrain.

5.1.1.2 Utilisation de MesoNH et CAMS

Une fois les schémas de vol adaptatifs implémentés dans le système **PPRZ**, il est possible de commencer les tests dans un environnement de simulation proche de la réalité. L'idée est d'ajouter à la simulation des données qui correspondent à celles d'un vrai nuage.

Grâce à la mise en place de l'architecture globale du système **NEPHELAE**, il est possible de se servir directement des données disponibles dans le fichier de la simulation **MesoNH** (voir section 3.3). Cela permet l'ajout dans le simulateur de drones d'une simulation dynamique d'un environnement nuageux s'étendant sur plusieurs kilomètres et pendant une durée d'une trentaine de minutes. Le rôle du logiciel **CAMS** dans l'architecture de simulation est d'offrir dans un premier temps un aperçu des données simulées des nuages et d'afficher les trajectoires du drone dans cet environnement. Ensuite, il permet de créer des nouveaux éléments de mission avec des schémas de vol adaptatifs à tester et de les ajouter à la liste de missions du

drone. Enfin, il est possible d'utiliser l'algorithme de cartographie intégré à CAMS même avec des mesures simulées, afin de tester différents algorithmes et de comparer la carte créée grâce aux données mesurées par le drone avec la vraie carte des nuages simulés.

5.1.2 Les résultats des motifs de navigation en simulation

Le principe est donc de se servir de ce simulateur global pour tester et valider le comportement des drones lors de l'exécution des schémas de vol adaptatifs développés pour explorer les nuages. Dans un premier temps les simulations ont été réalisées dans un environnement nuageux statique pour valider les trajectoires théoriques présentées dans le chapitre 4 et observer les éventuels blocages. Puis les schémas ont été testés sur des nuages dynamiques, évoluant et se déplaçant avec le temps, permettant alors de déceler les situations entraînant des pertes de suivi du nuage cible.

L'objectif de l'ensemble de ces tests est de prouver l'efficacité et la robustesse des stratégies de vol adaptatives pour explorer des nuages. Cependant il faut d'abord trouver une métrique caractéristique d'une bonne exploration. Les critères d'évaluation ont été discutés tout au long de la thèse. En effet, des métriques telles que la zone couverte par le drone par rapport au nuage ou encore le temps passé à l'intérieur ne sont pas forcément des bons candidats. Les scientifiques de l'atmosphère s'intéressent aussi bien aux phénomènes d'évolution aux bordures du nuage qu'à l'intérieur. Pour correctement évaluer les trajectoires résultantes des schémas de vol, les météorologues doivent analyser les données recueillies afin de voir si elles sont intéressantes en comparaison de celles collectées avec des schémas classiques. Comme il est impossible de réaliser de telles analyses sur chaque test effectué, ce travail se concentre sur cet ensemble de critères :

- Le temps nécessaire au schéma testé pour effectuer un tour de nuage (valable uniquement pour le *Lace* et le *Trinity*).
- Le nombre de points détectés à la bordure du nuage sur les cinq premières minutes d'exécution du schéma.
- Le temps moyen écoulé entre deux détections.
- Le pourcentage de temps passé dans le nuage pendant l'exploration.
- Le pourcentage de test où le schéma a échoué dans son exécution.

L'idée est donc de montrer une certaine répétabilité dans les tests réalisés et de se servir de ces métriques pour évaluer les schémas de vol adaptatifs. Pour l'ensemble des simulations, le drone simulé possède les mêmes caractéristiques que celui utilisé pour la campagne de mesure à la Barbade (voir 5.2). Son angle de roulis est limité à 15 degrés ce qui lui permet d'effectuer des rayons de cercle de minimum 150 mètres. On pourrait utiliser une vitesse verticale non nulle et effectuer une exploration en 3D, cependant les tests ont été effectués à une altitude fixe afin de faciliter l'étude des résultats. Pour finir, afin de raccourcir la durée globale des tests, l'origine de la

simulation de nuage est placée de façon à ce que le nuage ciblé soit proche de la zone de décollage et à une altitude basse.

5.1.2.1 Les simulations statiques

La première série de simulations statiques a pour but de valider le comportement des drones lorsqu'ils exécutent les nouvelles fonctions de navigation ajoutées à l'auto-pilote. Les schémas sont testés à tour de rôle sur des simulations mises en place avec ces paramètres :

- Le temps est figé dans la simulation de nuage MesoNH.
- Le nuage ciblé correspond à un nuage isolé occupant une zone rectangulaire de 552 mètres de large et 703 mètres de long orientée verticalement. Il s'agit là d'un grand nuage qui peut entrer dans un cercle d'environ 300 mètres de rayon.
- La vitesse de vol du drone est de 16 mètres par seconde.
- Les schémas de vol adaptatifs sont testés avec des paramètres de vent nuls pour correspondre au statisme des nuages. De plus le premier virage est toujours réglé sur la droite.

Chaque schéma est exécuté une première fois sur le nuage ciblé pendant une durée de 20 minutes puis plusieurs fois sur des périodes plus courtes (le temps nécessaire pour effectuer environ un tour du nuage), et avec différentes positions initiales. Cette approche permet à la fois de valider les stratégies de vol adaptatives pour explorer de façon autonome un nuage pendant sa durée de vie moyenne réelle et d'établir quelques analyses à l'aide des critères d'évaluation choisis.

5.1.2.1.1 Simulation 20 minutes La Figure 5.1 présente les résultats obtenus suite à l'exécution de la simulation statique de 20 minutes. Pour chaque schéma adaptatifs, trois instants sont représentés : à environ 5, 10 et 20 minutes. Sur la première image, les points de détection de bordure ont été superposés. La toute première observation est que le drone parvient à exécuter correctement les trois schémas pendant toute la durée de la simulation sans perdre le nuage. On peut également voir que les trajectoires obtenues sont de formes géométriques similaires aux théoriques. En comparant les trois images pour chaque schéma, on peut remarquer que le drone ne repasse jamais par les mêmes points, il est totalement autonome dans sa stratégie d'exploration et dans son choix de trajectoire. Enfin, les points de détection de bordure correspondent bien à la bordure réelle du nuage.

Les Figures 5.2, 5.3 et 5.4 affichent les points de bordure détectés sur la totalité du vol. En se basant uniquement sur ces points, on peut deviner la forme globale du nuage. Selon le schéma, on remarque que la distribution n'est pas la même. Pour le *Lace* et le *Trinity*, les points sont globalement répartis de façon homogène tout le long de la bordure du nuage. Ces résultats sont cohérents puisque ces schémas ont pour but d'explorer les zones frontalières. En revanche pour le *Rosette*, les points restent assez groupés, les trajectoires du drones sont donc très similaires d'un tour

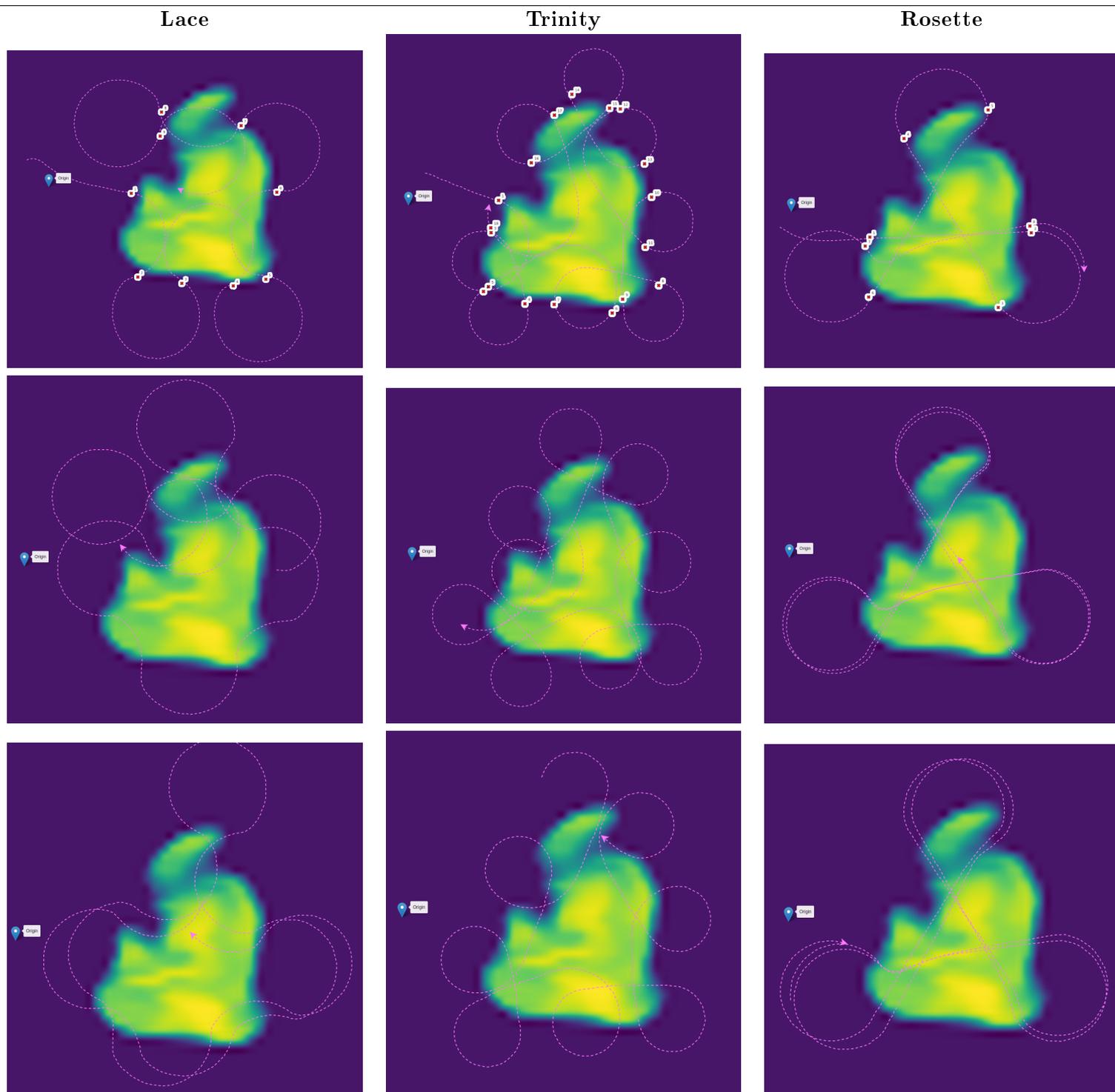


FIGURE 5.1 – Figure présentant les résultats des simulations statiques longues pour les trois schémas adaptatifs : à gauche le *Lace*, au centre le *Trinity* et à droite le *Rosette* ; à trois instants différents : en haut le début et en bas la fin

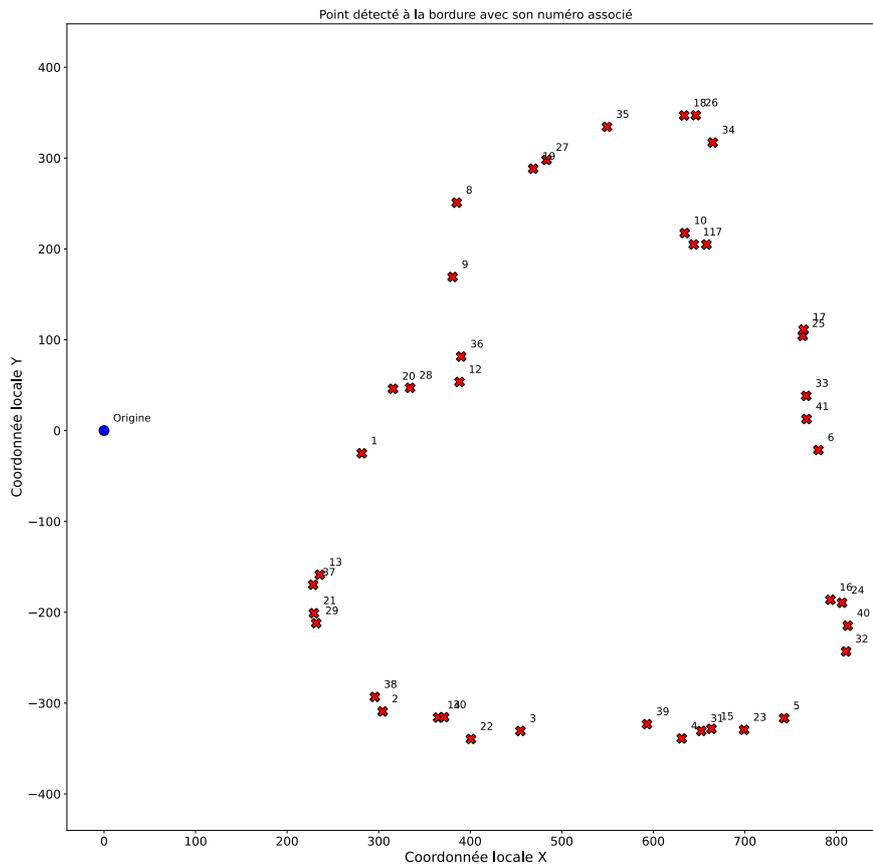


FIGURE 5.2 – Figure présentant un graphe des points de détection de bordure de la simulation longue pour le *Lace*

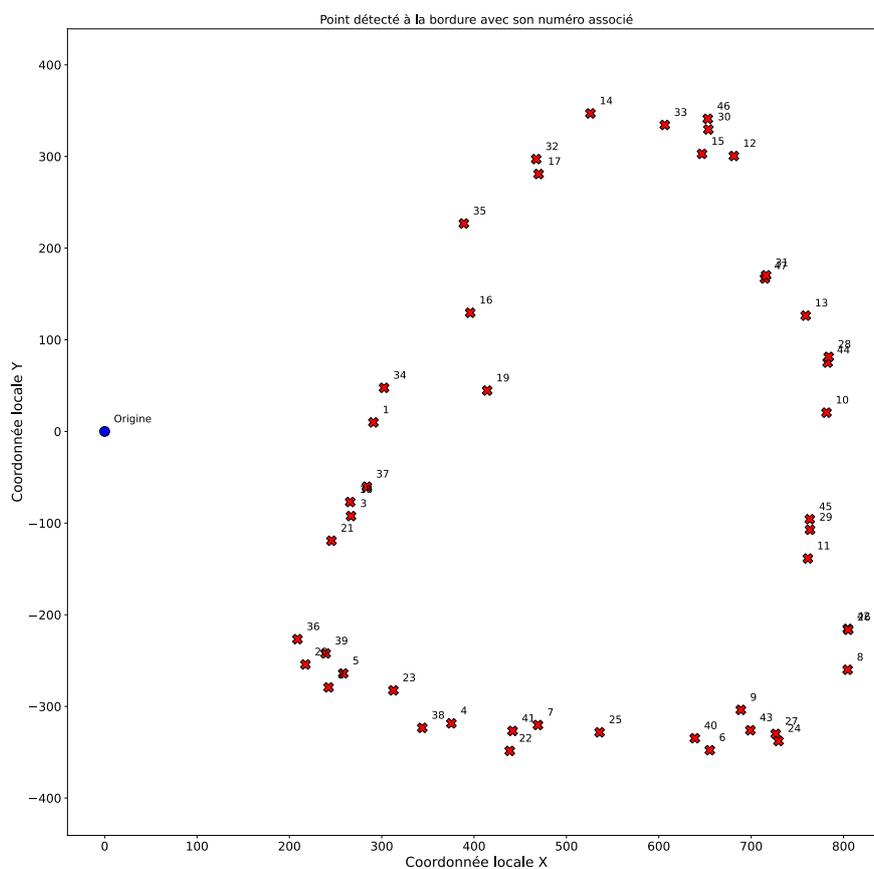


FIGURE 5.3 – Figure présentant un graphe des points de détection de bordure de la simulation longue pour le *Trinity*

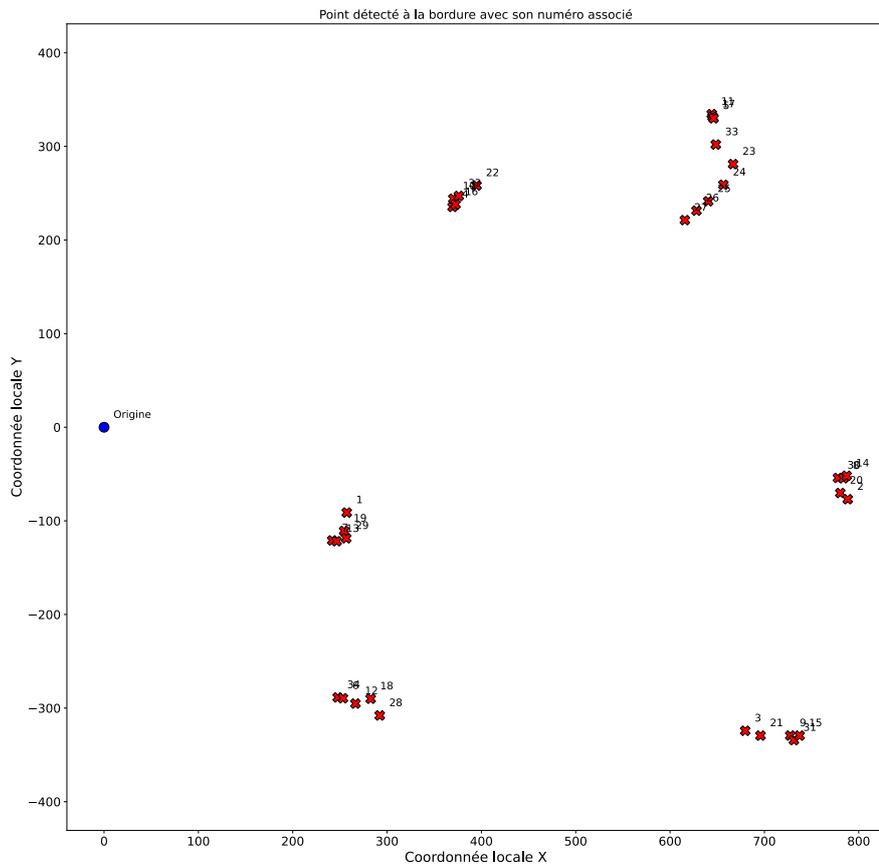


FIGURE 5.4 – Figure présentant un graphe des points de détection de bordure de la simulation longue pour le *Rosette*

à l'autre. Ce comportement est attendu puisque ce que ce schéma à la particularité de faire traverser le drone d'un bout à l'autre du nuage en passant par un centre estimé.

5.1.2.1.2 Simulations courtes Les Figures suivantes présentent pour chaque schéma deux simulations courtes avec des points de départ différents. À gauche on retrouve les trajectoires dans le vrai nuage simulé ; à droite sont affichées les cartes du nuage reconstruit grâce à l'algorithme de cartographie. Les points de détection de bordure sont superposés sur les deux images. Cet algorithme se sert des données recueillies par le drone pour construire la carte du nuage. Plus les données sont anciennes et moins elles ont d'importance pour le système de cartographie, ce qui se traduit par des couleurs plus estompées. Pour considérer la totalité du nuage reconstruit, il faut donc prendre en compte ces couleurs en plus du jaune vif. Pour les trois schémas adaptatifs, la reconstruction est proche du vrai nuage même si l'exploration ne dure que quelques minutes (entre 4 et 8 minutes). De plus, en comparant deux simulations avec deux départs différents, on note que les trajectoires effectuées ne sont jamais les mêmes ce qui explique des variations dans les cartes reconstruites.

- **Lace :**

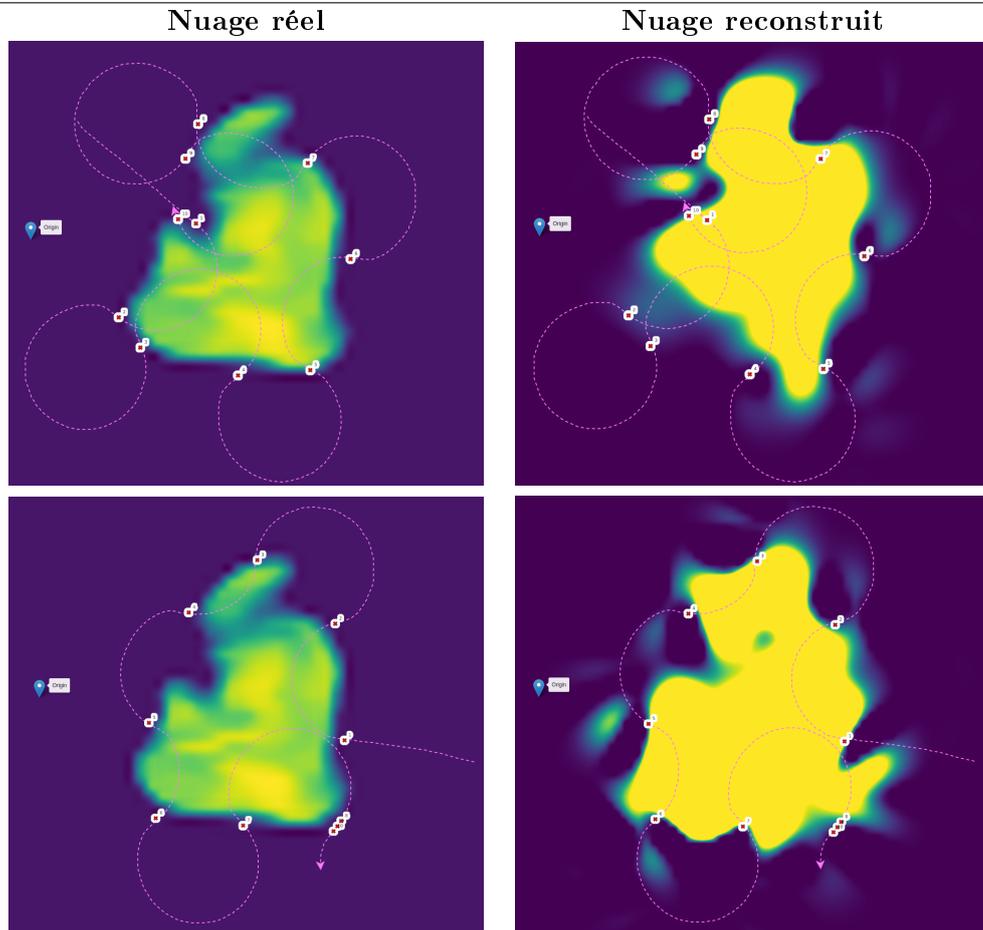


FIGURE 5.5 – Figure de l’exploration d’un nuage avec le schéma *Lace* en seulement un tour. À gauche, on retrouve la trajectoire dans le nuage réel et à droite dans le nuage estimé. Les points de détection de bordure sont superposés à l’interface de CAMS

Sur la Figure 5.5, on remarque que la trajectoire est dépendante du point de départ initial et du premier point d’entrée dans le nuage. Dans la première simulation comparée à la seconde, le drone semble prendre plus de temps entre deux détections de bordure, il passe donc plus de temps dans chaque état (*ExplorationIn* et *ExplorationOut*). Pour cette simulation, le tour complet est fait en environ six minutes contre moins de quatre pour la deuxième.

- Trinity :

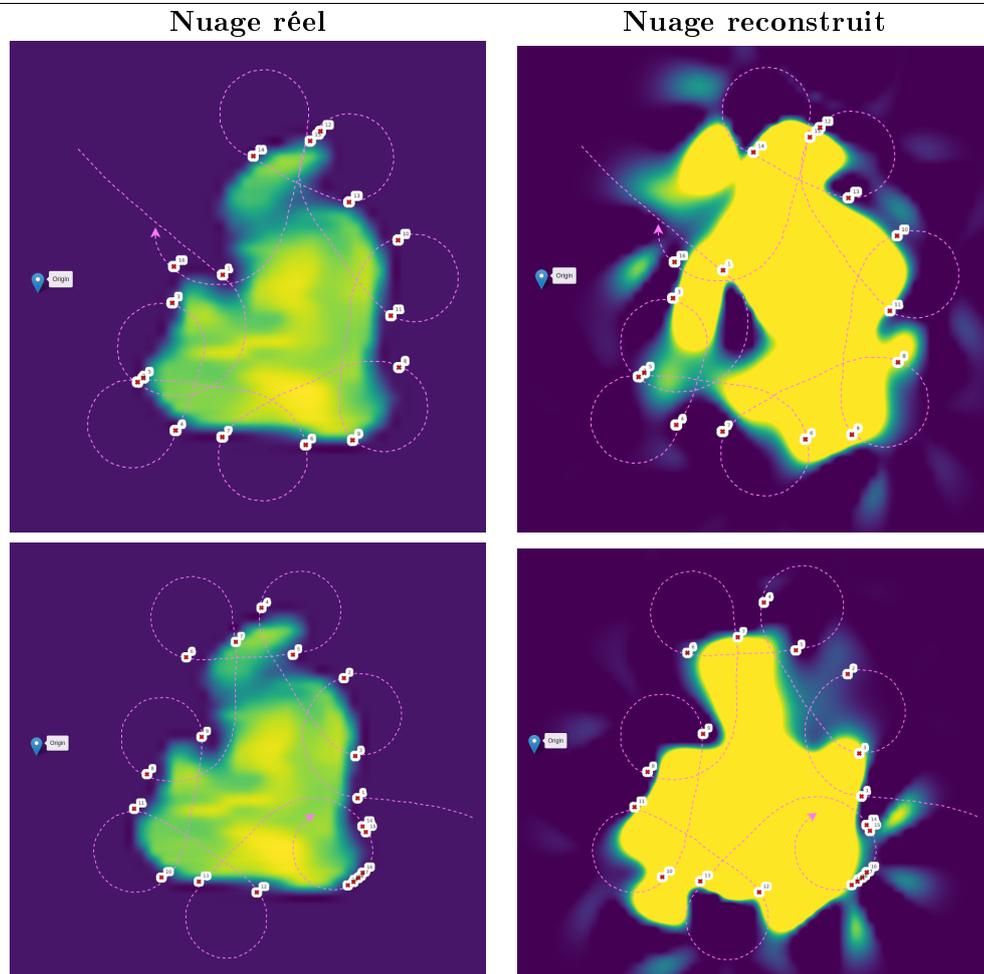


FIGURE 5.6 – Figure de l’exploration d’un nuage avec le schéma *Trinity* en seulement un tour. À gauche, on retrouve la trajectoire dans le nuage réel et à droite dans le nuage estimé. Les points de détection de bordure sont superposés à l’interface de CAMS

La Figure 5.6 apporte des observations différentes de celles effectuées sur le schéma *Lace*. On peut voir sur les deux images de gauche que les trajectoires du drone ont le même aspect, malgré le changement du point initial. En revanche, les formes du nuage reconstruit sont assez différentes. En effet, dans la première simulation les données les plus récentes recueillies par le drone se situent sur la partie haute du nuage conduisant à une estimation plus précise sur cette zone. À l’inverse, dans la seconde simulation l’exploration se termine sur la partie basse du nuage.

- Rosette :

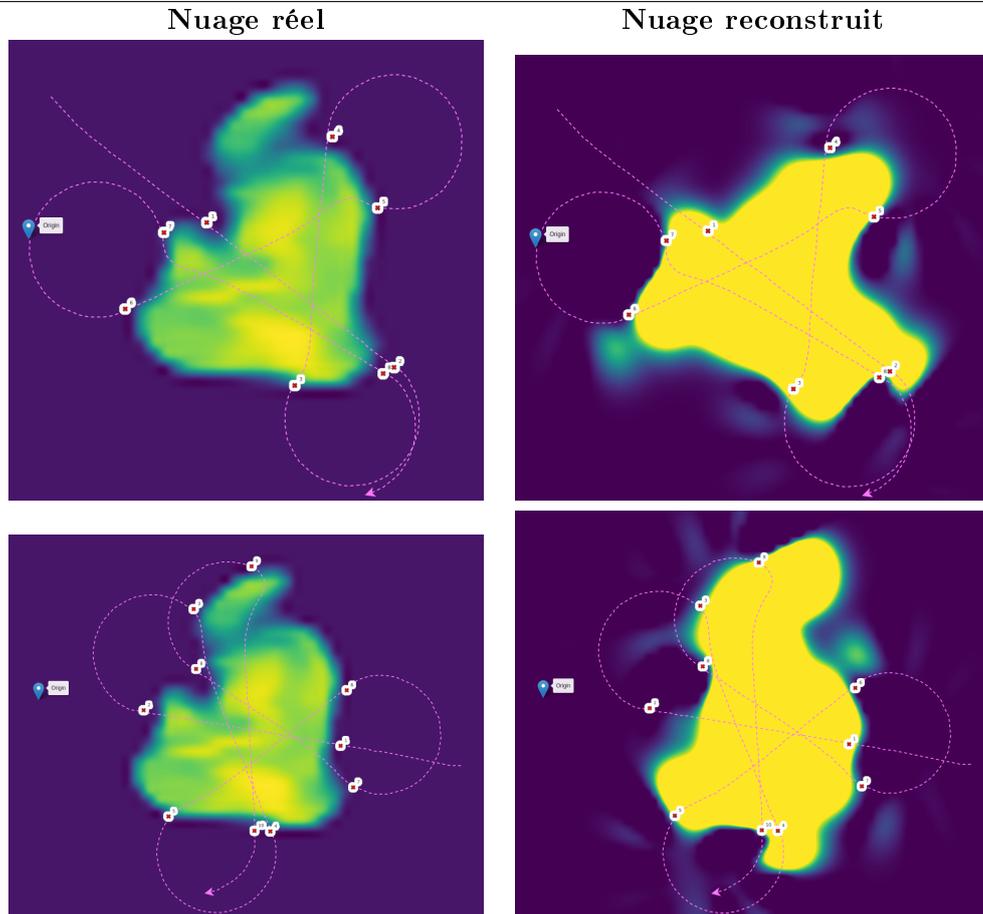


FIGURE 5.7 – Figure de l’exploration d’un nuage avec le schéma *Rosette* en seulement un tour. A gauche, on retrouve la trajectoire dans le nuage réel et à droite dans le nuage estimé. Les points de détection de bordure sont superposés à l’interface de CAMS

Les trajectoires présentées sur la Figure 5.7 se comportent pratiquement de la même façon peu importe le point de départ initial. Cependant, le nuage reconstruit est très différent et dépend vraiment des axes choisis par le drone pour traverser le nuage. Ainsi on obtient une forme de nuage estimé orienté dans la même direction que ces axes, plus horizontale pour la première simulation, et plus verticale dans la seconde.

5.1.2.1.3 Quelques statistiques Après ces premières observations sur les trajectoires du drone et le nuage reconstruit par le système de cartographie, le Tableau 5.1 regroupe les données statistiques des résultats obtenus sur une simulation longue et plusieurs simulations courtes d’après les critères d’évaluation discutés plus haut. Pour pouvoir tirer de réelles conclusions, il faudrait augmenter le nombre de

simulations. On propose ci-dessous quelques premières observations.

TABLE 5.1 – Tableau qui résume quelques statistiques sur les résultats des schémas adaptatifs obtenus en simulation

	Lace	Trinity	Rosette
Temps pour effectuer un tour de nuage (min)	5,0	6,5	N/A
Nombre de points de bordure détectés sur les cinq premières minutes	9	13	8
Temps moyen entre deux détections (sec)	29	23	35
Pourcentage de temps passé dans le nuage	44	55	54
Nombre de simulation	7	6	5

Pour le schéma *Rosette*, la durée d'un tour de nuage n'a pas été relevée car cette donnée n'est pas cohérente vu la stratégie du schéma. D'après ces moyennes on peut faire plusieurs observations sur l'efficacité de chaque schéma. Tout d'abord, le *Lace* permet de faire un tour du nuage rapide (environ 5 minutes) en comparaison du *Trinity* (6,5 minutes). Deuxièmement, le nombre de point de bordure détectés sur cinq minutes est plus élevé pour le *Trinity* que pour les deux autres schémas. Son temps entre deux détections est également le plus faible. Pour ce qui est du temps passé dans le nuage, ce sont les schémas *Trinity* et *Rosette* qui ont des pourcentages supérieurs. Ils passent plus de la moitié du vol à l'intérieur du nuage à l'inverse du *Lace*.

Pour conclure sur les résultats des simulations statiques, le schéma *Lace* offre l'avantage d'effectuer un tour du nuage plus rapidement et de permettre une bonne reconstruction du nuage. En revanche, les trajectoires entre deux tours peuvent être largement différentes et donc impacter la durée du tour du nuage (on calcul un écart type de 3,5 min). Pour le schéma *Trinity*, la forme du nuage reconstruite n'est pas aussi exacte que pour le *Lace* et la durée d'un tour du nuage est plus longue. L'avantage réside dans le grand nombre de point détectés à la bordure ainsi que le pourcentage élevé de temps passé dans le nuage. Enfin pour le *Rosette*, on obtient peu de points de bordure et ceux ci se retrouvent groupés dans certaines zones du nuage contrairement aux autres schémas qui présentent une meilleure distribution. La forme du nuage reconstruite reste tout de même très correcte, même si elle dépend des axes de traversés du nuage. Comme le *Trinity*, il est également idéal au niveau du pourcentage de temps passé dans le nuage.

Globalement, le *Lace* semble être le schéma idéal pour établir rapidement la forme d'un nuage. Le *Rosette* est idéal pour collecter beaucoup de données à l'intérieur du nuage tout en conservant une bonne reconstruction du nuage. Finalement, le *Trinity* combine plusieurs avantages puisqu'il permet de collecter à la fois beaucoup

des données à la bordure et à l'intérieur du nuage.

5.1.2.1.4 Cas d'erreurs dans la logique du schéma Chaque schéma de vol adaptatif présente des risques d'échec. Pour établir un pourcentage d'échec significatif, il faudrait effectuer un plus grand nombre de simulations. Voici tout de même les cas d'échec rencontrés lors de la phase de test statique :

- **Lace et Trinity :**

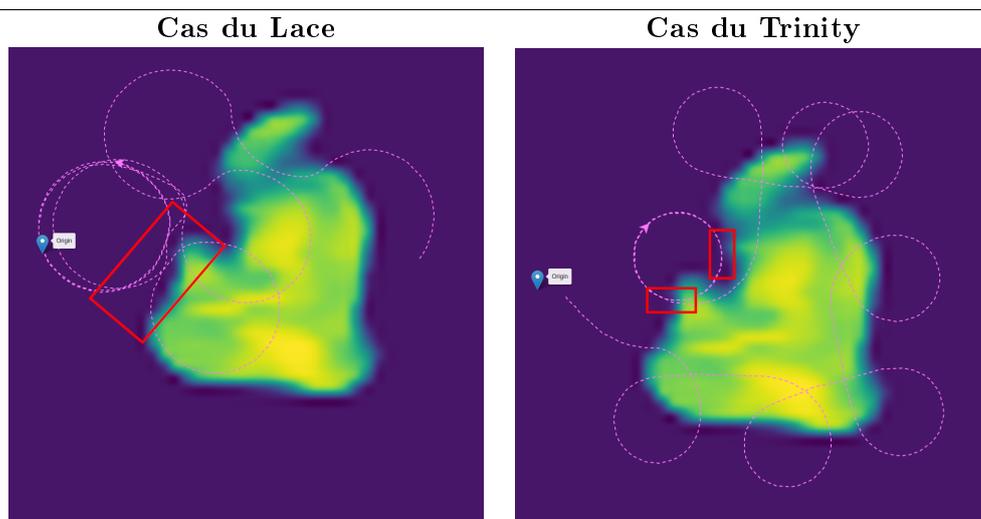


FIGURE 5.8 – Figure de l'exploration d'un nuage ayant présenté un blocage. À gauche l'exécution d'un schéma *Lace* et à droite d'un schéma *Trinity*. En rouge, les zones qui ont conduit à un blocage

La Figure 5.8 présente le cas d'échec des schémas *Lace* et *Trinity*. Pour le *Lace*, lorsque le drone se retrouve à effectuer une trajectoire tangentielle à la bordure du nuage (rectangle rouge), la détection d'un point de bordure va déclencher un calcul de centre de cercle entraînant le drone à se retrouver dans la même situation ; il tourne alors en boucle. Pour le *Trinity*, c'est une détection tangentielle et une détection perpendiculaire (rectangles rouge) dans la même zone qui entraîne le drone à tourner sur le même cercle indéfiniment.

- **Rosette :** Les seuls cas d'échec pouvant être rencontrés lors de l'exécution d'un schéma *Rosette*, proviennent d'un mauvais paramétrage du calcul du barycentre du nuage. Cela conduit généralement le drone à tourner en boucle dans une seule zone du nuage.

5.1.2.2 Des cas plus complexes en simulation dynamique

La seconde série de simulation prend place dans un environnement dynamique. L'objectif est de prouver que les schémas de vol adaptatifs sont capables de suivre l'évolution géométrique et le déplacement du nuage pendant sa durée de vie. Dans un

premier temps une analyse de l'ensemble des nuages disponibles dans la simulation a été effectuée de façon à trouver le candidat idéal pour réaliser les tests.

De la même façon que les simulations statiques, les tests sont réglés avec des paramètres particuliers :

- Le nuage choisi évolue et se déplace entre 2 minutes et 12 minutes dans la simulation de nuage MesoNH (durée de vie de 10 minutes). La Figure 5.9 montre le nuage test à trois moments de son développement : à environ 2 minutes, 7 minutes 30 secondes et 10 minutes 20 secondes. Il est de taille différente à chaque instant : 900 par 650 mètres, 775 par 648 mètres et finalement 647 par 630 mètres. Le cadre rouge correspond à la zone occupée par le nuage mesurée par le système de cartographie. Le repère bleu est le centre estimé du nuage. En prenant les coordonnées de ce centre aux trois instants, on calcule le vent moyen considéré comme constant. Le système de cartographie et de l'autopilote étant dans un repère selon les points cardinaux, le vent moyen est de 6,86 m/s provenant de l'Ouest vers l'Est, et de 1,06 m/s du Nord au Sud.

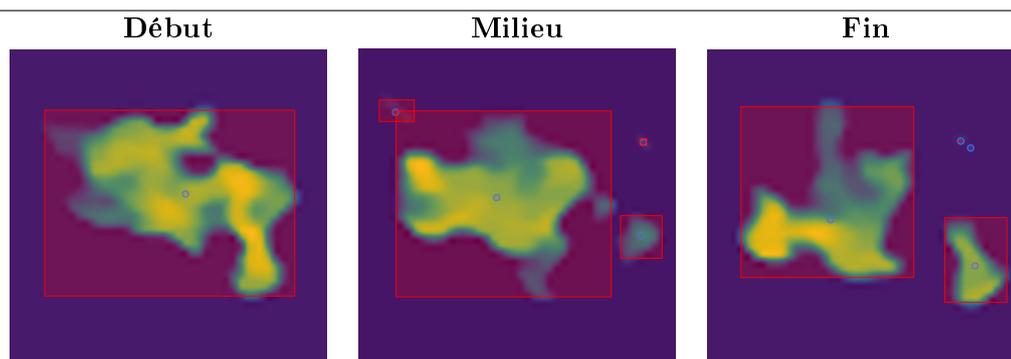


FIGURE 5.9 – Figure présentant la forme du nuage à trois instants de son évolution : de gauche à droite, du début à la fin de sa vie. Les couleurs jaunes correspondent à la position du nuage, la bordure rouge à la zone calculée du nuage avec le système CAMS et enfin le point en bleu correspond au centre estimé du nuage

- Le vent appliqué à la simulation et qui contraint les trajectoires du drone provient d'un outil de PPRZ. Ce logiciel est donc paramétré d'après les valeurs du vent moyen calculées ci-dessus.
- Les schémas de vol adaptatifs sont testés avec des paramètres de vent fixés en fonction du vent moyen calculé (légèrement supérieurs). Le premier virage est toujours défini sur la gauche.
- La vitesse de vol du drone est de 20 mètres par seconde.

Chaque schéma a été exécuté six fois sur des périodes de dix minutes ce qui correspond à la durée de vie du nuage ciblé. L'objectif de ces simulations est de montrer que les trois schémas de vol adaptatifs sont capables de suivre correctement le nuage. Sur la totalité des simulations, le drone est parvenu à rester dans la zone du nuage ciblé sur toute ou la majeure partie de la durée des tests. Dans quelques

cas, il a été légèrement détourné de sa cible par une détection d'un petit nuage environnant. Par la suite, seulement une simulation par schéma sera détaillée, les cas d'échec seront discutés à la fin de la section.

5.1.2.2.1 Simulations dynamiques du *Lace* La Figure 5.10 présente quatre instants de l'exécution du schéma *Lace* dans l'environnement nuageux dynamique. Tout d'abord, on peut observer que le drone a réussi à suivre le nuage sur la totalité de la simulation malgré la présence de petits nuages venant perturber sa trajectoire. Les deux premières images montrent qu'à chaque nouvelle détection de bordure, le drone a bien appliqué sa stratégie de calcul de nouveaux centres de cercle, représentatif du comportement du schéma *Lace*. Sur la troisième image, le drone a rencontré un bout détaché du nuage ciblé. Ce dernier étant situé assez proche du nuage principal il a pu retrouver naturellement sa cible initiale en effectuant sa trajectoire prévue. Il est donc encore dans le nuage principal à la fin de la simulation sur la quatrième image. Rappelons que la simulation est dynamique et que le nuage se déplace principalement vers la gauche, ce qui explique les zones où les trajectoires sont comme "entrelacées".

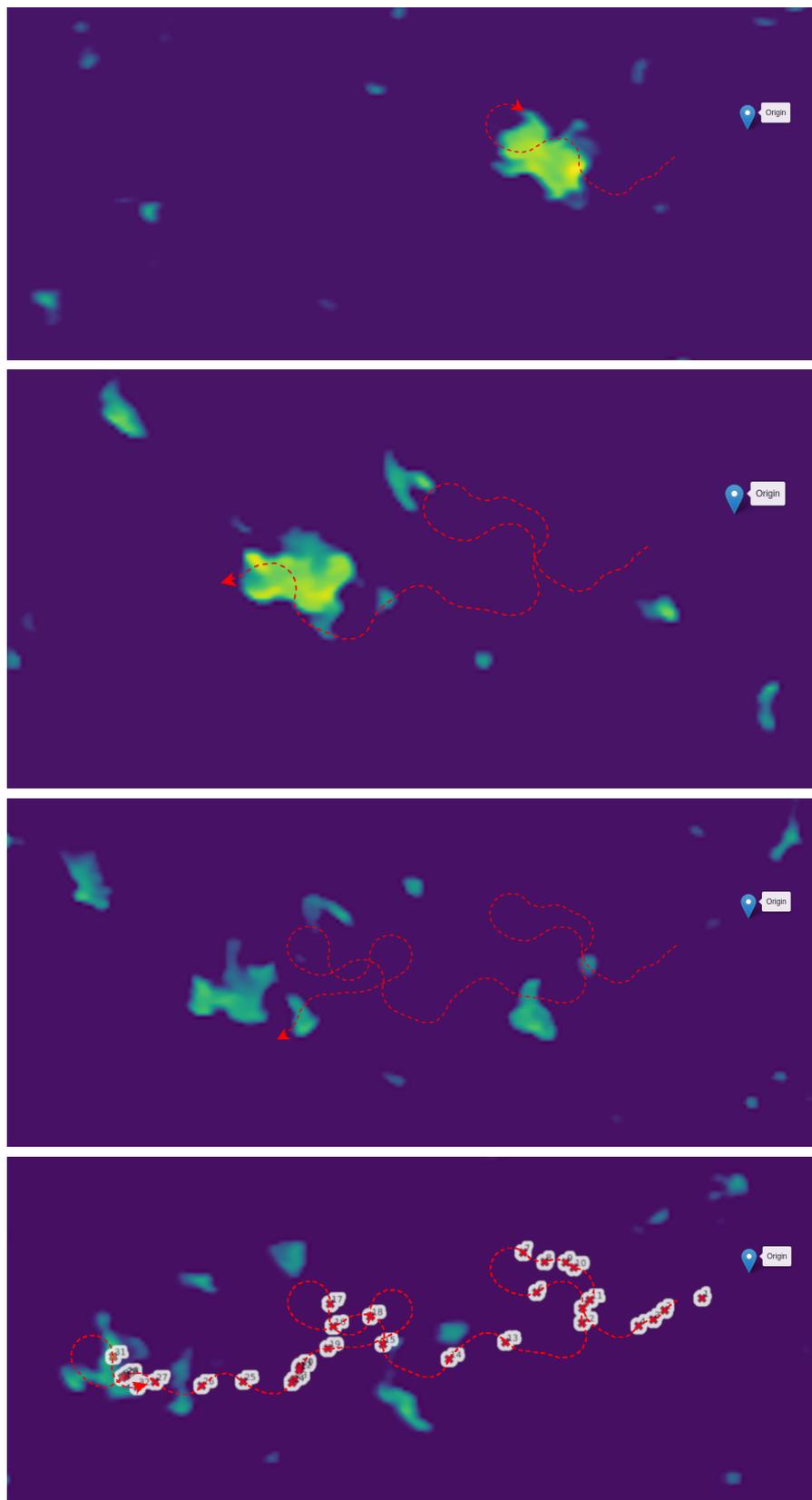


FIGURE 5.10 – Figure présentant les résultats des simulations dynamiques pour le schéma *Lace* à quatre moments différents de son exploration : en haut le début et en bas la fin

5.1.2.2.2 Simulations dynamiques du *Trinity* La Figure 5.11 présente quatre instants de l'exécution du schéma *Trinity* en simulation dynamique. Le drone garde un bon suivi du nuage. On remarque que les boucles caractéristiques du schéma sont espacées sur les deux premières images et à l'inverse sont plus rapprochées sur les deux dernières. Dans le cas où la direction de calcul du prochain cercle est dans la même direction que le vent, la trajectoire pour rejoindre ce cercle est plus longue. En revanche, quand le prochain cercle est dans la direction opposée du sens du vent, cette trajectoire est plus courte. L'impact du vent sur la trajectoire du drone est bien sûr visible sur l'ensemble des schémas, mais il est plus évident à constater avec le schéma *Trinity*. On peut noter que sur l'ensemble de la simulation le drone a effectué qu'un tour de nuage là où le *Lace* en a effectué plus de deux.

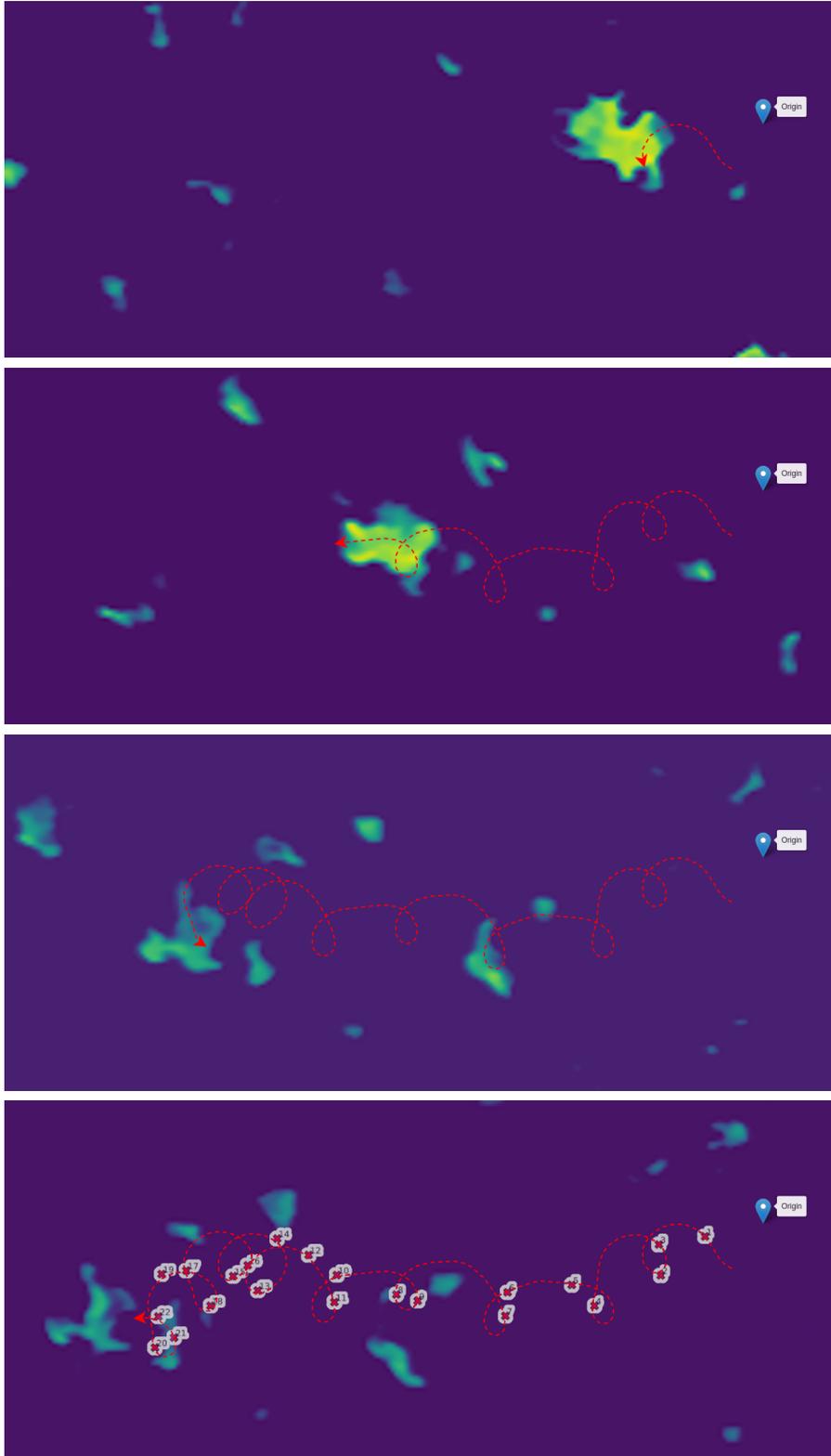


FIGURE 5.11 – Figure présentant les résultats des simulations dynamiques pour le schéma *Trinity* à quatre moments différents de son exploration : en haut le début et en bas la fin

5.1.2.2.3 Simulations dynamiques du *Rosette* Quatre instants de la simulation d'un drone exécutant le schéma *Rosette* sont affichés sur la Figure 5.12. Dans cette simulation, le calcul par défaut du barycentre du nuage est effectué avec la même méthode qu'en simulation statique. On remarque que le point estimé du centre est trop éloigné du centre réel. Le drone exécute bien le schéma mais se retrouve alors à explorer une zone restreinte du nuage. Les six simulations utilisant ce barycentre ont présenté le même défaut. Il réussit malgré cela à garder son suivi. Pour améliorer l'exploration, l'opérateur a la possibilité de déclarer un point de centre de nuage fictif, remplaçant ainsi le barycentre. Six nouvelles simulations ont été effectuées avec cette nouvelle méthode et les données statistiques sont calculées à partir de ces nouvelles simulations.

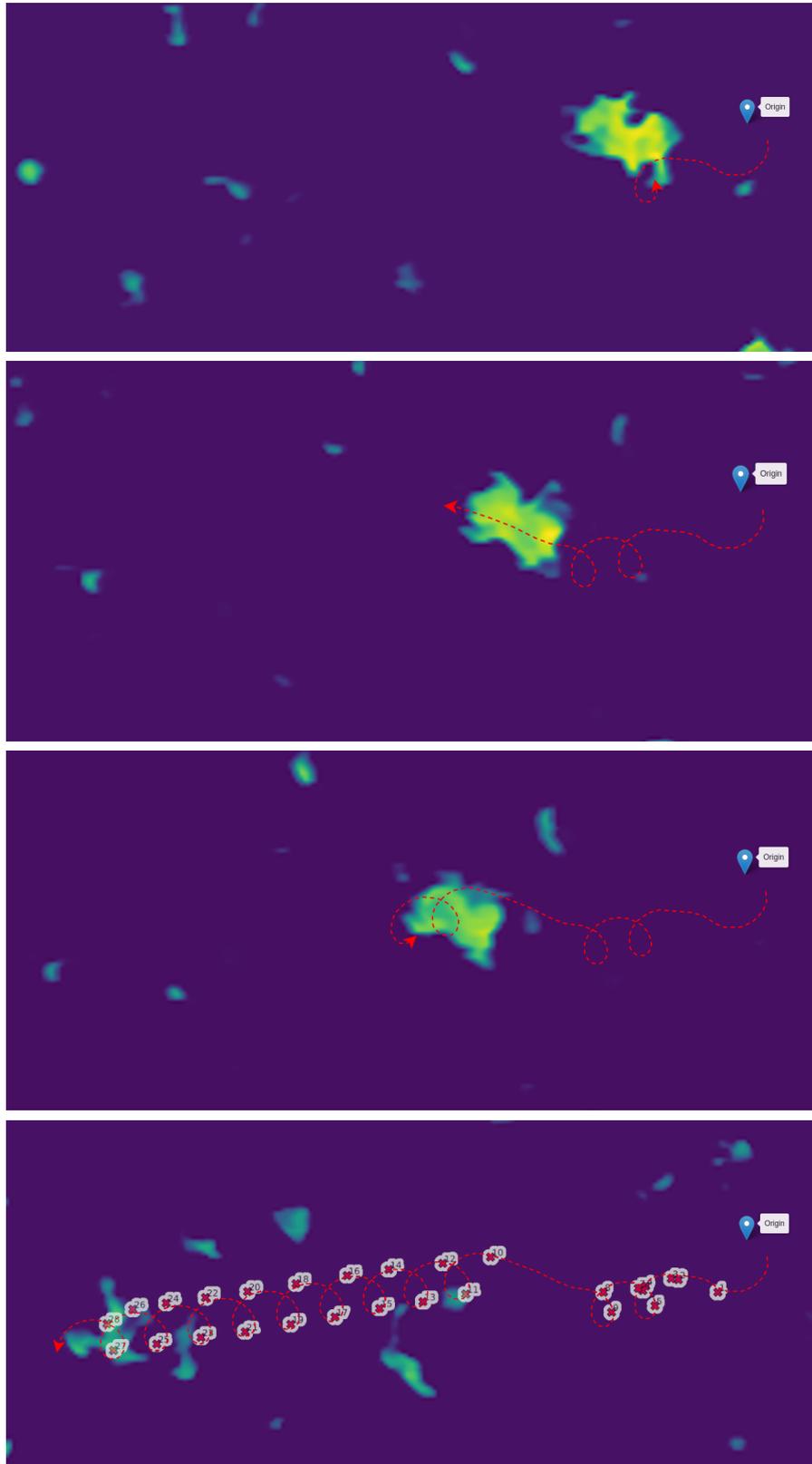


FIGURE 5.12 – Figure présentant les résultats des simulations dynamiques pour le schéma *Rosette* (avec un calcul de barycentre par défaut) à quatre moments différents de son exploration : en haut le début et en bas la fin

La Figure 5.13 expose quatre moments d'une exploration à l'aide du schéma *Rosette* avec un centre de nuage forcé par l'opérateur. Le comportement de la trajectoire est alors plus représentatif du schéma *Rosette* puisque le drone traverse de part et d'autre le nuage. Sur ces quatre images on peut voir que le drone tourne bien dans le même sens lorsqu'il sort du nuage. Le suivi du nuage s'est bien déroulé pendant la durée de toute la simulation.

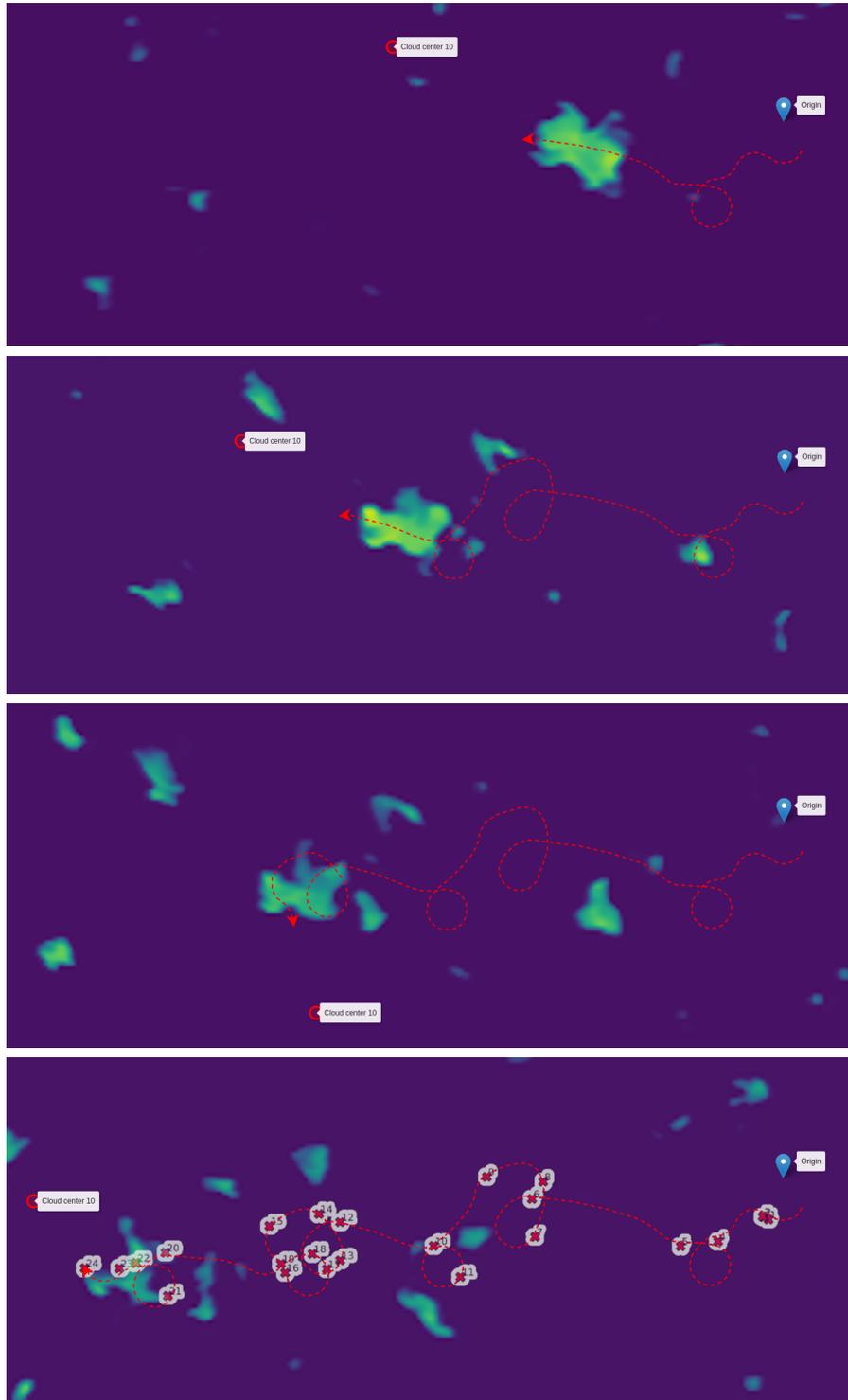


FIGURE 5.13 – Figure présentant les résultats des simulations dynamiques pour le schéma *Rosette* (avec un centre de cercle forcé par l'opérateur) à quatre moments différents de son exploration : en haut le début et en bas la fin

TABLE 5.2 – Tableau résumant quelques statistiques sur les résultats des schémas adaptatifs obtenus en simulation dynamique

	Lace	Trinity	Rosette
Nombre de points de bordure détectés sur les cinq premières minutes	12	16	11
Temps moyen entre deux détections (sec)	23	19	25
Pourcentage de temps passé dans le nuage	34	48	53

5.1.2.2.4 Quelques statistiques Le Tableau 5.2 regroupe les données statistiques réalisées sur environ six simulations dynamiques. On retrouve ici les mêmes tendances qu'en simulation statique. Le *Trinity* conserve une moyenne de point de bordure détectés sur cinq minutes plus élevée que pour les deux autres schémas. De plus, le pourcentage de temps passé dans le nuage est plus élevé pour les schémas *Trinity* et *Rosette* que pour le *Lace*. Globalement, ces pourcentages pour le *Trinity* et le *Lace* sont réduits par rapport aux tests statiques, cette différence s'explique par le caractère dynamique de la simulation (qui va vite forcer le drone à se retrouver en dehors du nuage, et passer du temps à le "rattraper"). Le *Rosette* maintient quant à lui un bon temps à l'intérieur du nuage. Ces quelques statistiques nous confirment donc les premières observations faites pendant les simulations statiques sur les spécificités des différents schémas.

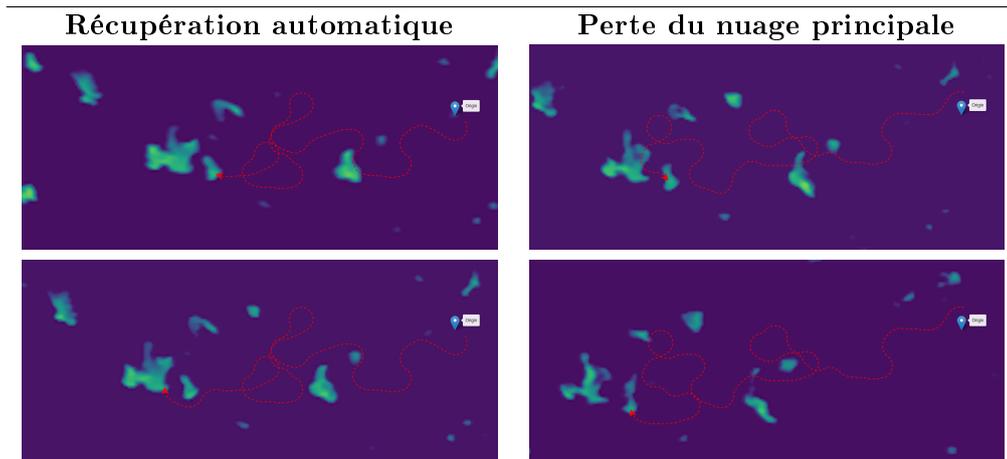


FIGURE 5.14 – Figure présentant les résultats de simulations dynamiques pour le schéma *Lace* dans laquelle l'exploration a été perturbée par une détection de petit nuage. Deux instants différents sont représentés, à gauche : le drone retrouve le nuage principal ; à droite : il persiste à explorer le petit nuage

5.1.2.2.5 Cas d'erreurs dans la logique du schéma Le premier cas d'erreur qui touche tous les schémas de vol est causé par des petites bribes de nuage qui viennent perturber l'exécution du schéma. Cela conduit généralement le drone à se détourner du principal. La position du petit nuage par rapport au nuage ciblé à son importance : s'il est assez proche le drone peut éventuellement retrouver son suivi initial comme dans les images de gauche de la Figure 5.14. Cependant, dans certains cas le drone confond cette bribe de nuage avec son nuage cible comme illustré sur les images de droite.

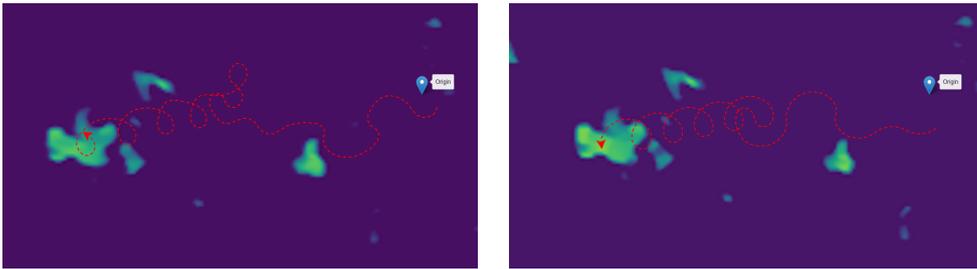


FIGURE 5.15 – Figure présentant deux simulations où le drone se retrouve bloqué à l'intérieur du nuage à exécuter un schéma *Lace*

Le principal cas d'erreur qui touche toutes les stratégies d'exploration est dû aux valeurs de vent utilisées comme paramètres aux schémas de vol. Si ces valeurs sont similaires au vrai vent, cela conduit à un cas d'erreur comme présenté sur la Figure 5.15. Dans cette simulation, le drone calcule un cercle à l'intérieur du nuage. Le vent paramétré pour le schéma étant identique au vrai vent, cela pousse le cercle (et donc le drone) à se déplacer à la même vitesse que le nuage et à rester à l'intérieur indéfiniment.

Lors d'un vol en conditions réelles, les valeurs de vent sont modifiées par l'opérateur en fonction du vent estimé par le drone. Il s'avère que cette estimée est imprécise ; pour reproduire au mieux la réalité, on a donc fait varier ces valeurs de vent appliquées. Dans le cas où les valeurs de vent paramétrées sont très différentes du vrai vent, le drone peut se retrouver dans les cas d'erreur de la Figure 5.16. Un vent appliqué inférieur au vrai vent conduit le drone dans une situation similaire aux images de gauche (en retard sur le nuage) ; un vent supérieur mène à une situation où le drone est en avance sur le nuage (comme sur les images de droite).

Pour conclure sur ces simulations dynamiques, les schémas de vol adaptatifs prouvent qu'ils sont capables de suivre correctement un nuage avec des stratégies différentes. En testant les limites de ces schémas, le seul moyen de faire échouer le suivi du nuage est de paramétrer le vent des schémas à des valeurs très différentes de celles du vent réel impactant les trajectoires du drone.

5.1.3 Simulations hybrides

Les premières observations réalisées lors des simulations statiques et dynamiques permettent dans un premier temps de valider le comportement des drones lors de

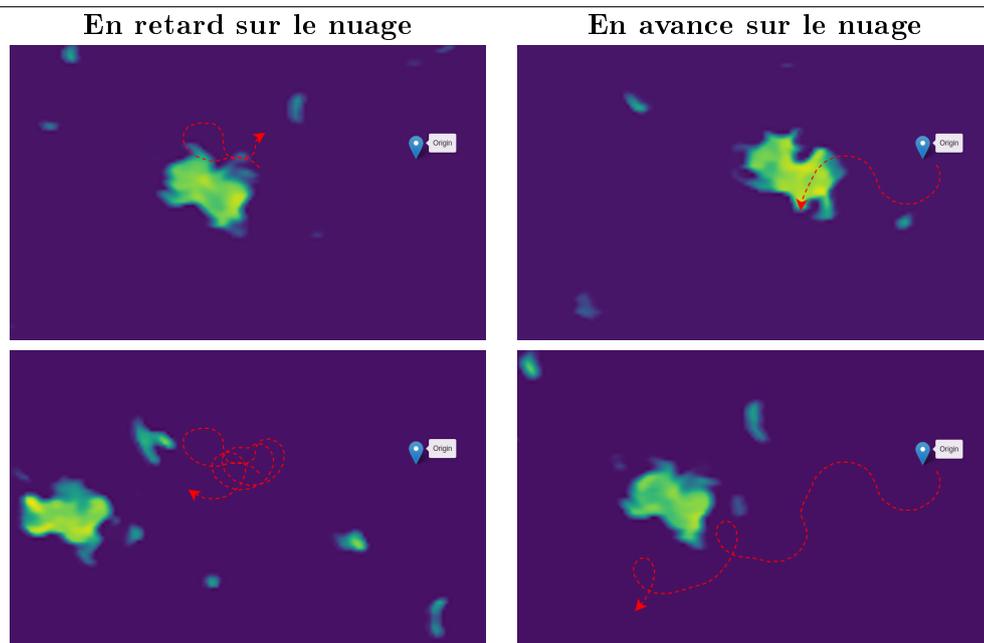


FIGURE 5.16 – Figure présentant deux simulations où le drone se retrouve bloqué à l’extérieur du nuage à exécuter un schéma *Lace*. A gauche, le drone est en retard sur le nuage et à droite en avance

l’exécution de ces nouveaux schémas de vol adaptatifs. L’analyse des résultats obtenus prouve que ces stratégies d’exploration possèdent un fort potentiel en termes de collecte de données dans un environnement dynamique en comparaison des schémas classiques. Avant de procéder au déploiement de la flotte dans un environnement réel (campagne à la Barbade), une phase de tests hybrides a été mise en place. L’équipe du projet **NEPHELAE** s’est rendue pendant deux jours courant Novembre 2019 au Centre de Recherche Atmosphérique de Lannemezan (Hautes Pyrénées) afin de réaliser cette phase de tests préliminaires. L’objectif était dans un premier temps d’identifier les difficultés de mise en place du système global et de prendre en main l’ensemble des logiciels qui le compose. Cela a permis également de remettre en état les drones et de les régler avant leur départ au Caraïbes. Le but principal de ces tests étaient notamment d’effectuer des simulations hybrides : utiliser des vrais drones évoluant dans un environnement en 3D sans nuage et simuler la présence d’un cumulus à l’aide du fichier MesoNH et du système CAMS pour en réaliser son exploration à l’aide des schémas de vol adaptatifs.

La Figure 5.17 présente trois photos prises pendant les vols expérimentaux à Lannemezan. En haut, on peut voir deux photos du poste de commande des opérateurs composé principalement de la station sol pour contrôler les drones et des différentes interfaces de CAMS pour la cartographie, la création et la gestion des éléments de mission. En bas, on retrouve une photo en vol d’un drone autonome Skywalker X6 prise par un autre drone piloté qui le suivait pendant sa mission.

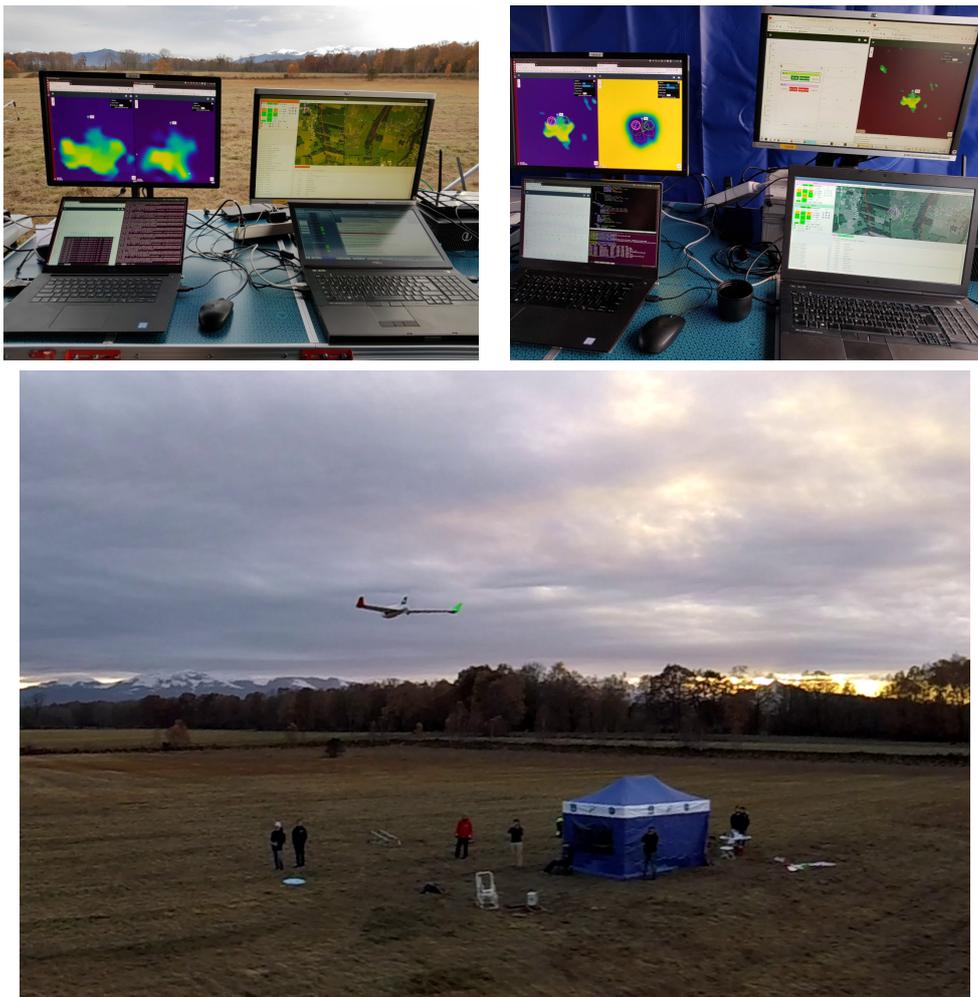


FIGURE 5.17 – Figure présentant des photos prises pendant les tests expérimentaux à Lannemezan. En haut le poste de commande, en bas un drone en vol

Pour résumer rapidement sur ces simulations hybrides, on peut dire que les différents objectifs ont été remplis. D'un point de vue de la mise en place du système, cette expérience a permis à toute l'équipe de mieux en comprendre son fonctionnement et d'identifier les points bloquants éventuels. Pour les drones, cela a donné l'occasion au pilote de sécurité de reprendre leurs habitudes sur ces modèles particuliers et de réaliser les derniers réglages. De plus, le bon fonctionnement des modems longue portée fraîchement installés a été validé. Pour finir, les simulations hybrides ont permis de confirmer que les drones étaient capables de suivre les trajectoires générées par les stratégies d'exploration adaptatives dans le monde réel. Les observations faites sur leurs comportements en vol et sur les bugs rencontrés (conduisant dans un cas à un crash) ont révélé les quelques faiblesses de notre système à corriger impérativement avant la vraie campagne. Une remarque très importante s'est notamment dégagée de ces observations : la différence entre le vent réel qui contraint les trajectoires du drone en vol et le vent fournit aux schémas de vol adaptatifs joue un rôle crucial dans le bon déroulement de l'exploration et du suivi de la cible.

5.2 Campagne de vols expérimentales à la Barbade

L'objectif de cette thèse, ainsi que du projet [NEPHELAE](#), est d'effectuer un échantillonnage spatio-temporel de nuages pour permettre aux météorologues d'enrichir leurs modèles atmosphériques. Les simulations utilisant des modèles imprécis, les schémas de vol adaptatifs ne peuvent être testés et validés qu'en simulation. La campagne de vols expérimentale réalisée dans le cadre du projet [NEPHELAE](#) a permis de déployer les drones dans des conditions réelles et d'observer le comportement des schémas de vol adaptatifs. La première partie de cette section est dédiée à la présentation du contexte de la campagne. La seconde partie détaille les étapes importantes d'une opération de vol typique. La troisième partie met en évidence les résultats obtenus durant la campagne et apporte une analyse pour mieux les interpréter. Pour finir, un résumé de la campagne est exposé et une réflexion sur la similarité entre les simulations et les expérimentations est proposée.

5.2.1 Contexte

La campagne de vols expérimentale du projet [NEPHELAE](#) a pris place suite à une invitation d'une organisation de météorologues nommée [EUREC4A](#) [[Bony 2017](#)] à participer à une grande campagne de mesures atmosphériques sur l'île de la Barbade, dans les Caraïbes. Différentes équipes de plusieurs pays ont contribué aux mesures à l'aide de moyens variés. Des équipes à bord d'avions pour récolter des mesures à hautes altitudes et larguer des sondes, d'autres sur des bateaux pour mesurer la houle et des données basses altitudes et enfin des équipes déployant des drones. Le choix de la Barbade pour cette campagne est lié à sa localisation particulière qui entraîne des conditions atmosphériques propices au développement des nuages. Cette île correspond au point le plus à l'Est des Caraïbes et un vent pratiquement constant provenant principalement de l'Est pousse les nuages à se dé-

velopper à quelques dizaines de kilomètres des côtes pour les emporter ensuite vers les terres.

L'équipe de **NEPHELAE** a donc profité des autorisations de vol exceptionnelles accordées par les autorités locales pour déployer le système de flotte de drones développé. Les dix membres du projet (ingénieurs, doctorants, chercheurs) se sont relayés pendant trois semaines pour effectuer des collectes de mesures dans les nuages avec la flotte en fonction des conditions météorologiques du jour. En dehors des missions d'exploration, les opérateurs réalisaient également des tâches de maintenance sur les drones et des améliorations sur le code des différents systèmes.



FIGURE 5.18 – Figure présentant deux photos du terrain de la campagne (Morgan Lewis, Barbados)

Le terrain d'opération (Figure 5.18) a été choisi sur la côte Est de façon à intercepter les nuages au large des côtes et de les suivre pendant leur développement. Deux containers de stockage et un container équipé électriquement (et climatisé) pour les opérateurs étaient disposés dans un champ de 100 mètres de large et long de 500 mètres se situant à 600 mètres de la mer. En plus d'une localisation idéale, ce champ permettait d'avoir une zone inhabitée dans un rayon de 500 mètres. Le terrain était partagé entre l'équipe **BOREAL** qui déployait un drone de 4,2 mètres d'envergure pouvant embarquer jusqu'à 5 kilogrammes d'équipements et l'équipe **NEPHELAE**.

Chaque équipe avait un espace de vol attribué. Cependant certaines zones pouvaient entraîner des conflits, c'était donc aux opérateurs de chaque équipe de veiller à la déconfliction de leurs drones avec les autres équipes partageant le même espace. Tout au long de la campagne une attention particulière a été portée sur la sécurité que ce soit au sol ou dans les airs. Pour le projet **NEPHELAE**, l'espace aérien autorisé prenait la forme d'un cône tronqué de 15 kilomètres de long et 2,5 kilomètres de large avec une altitude de vol pouvant aller de 1000 à 2000 mètres (zone rouge sur la figure 5.19). L'altitude était fixée suite à un appel à la tour de contrôle de l'aéroport local pour s'assurer d'un espace aérien dégagé pendant une certaine période.

La flotte était constituée de plusieurs Skywalker X6 (Figure 5.20) qui sont des ailes volantes en mousse du commerce. D'une envergure de 1,5 mètres, ils se déplacent à une vitesse de 12 à 22 m/s (15 m/s en vitesse de croisière) et peuvent embarquer environ un kilogramme de charge utile. Les drones étaient tous équi-

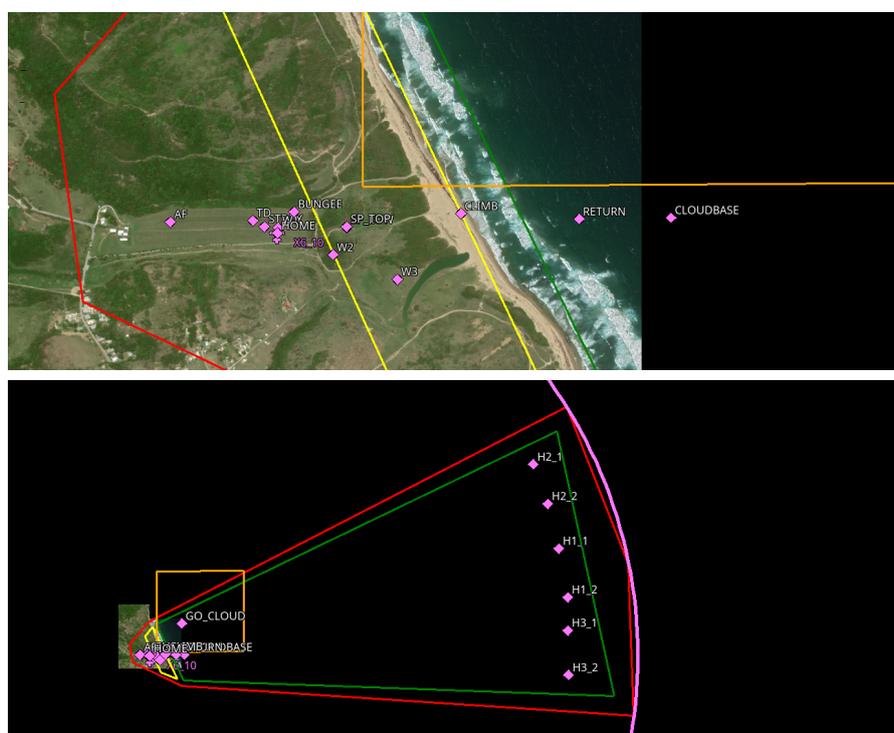


FIGURE 5.19 – Figure présentant deux captures d’écran sur le terrain pendant la campagne. En haut on retrouve une version plus zoomée sur le terrain et en bas une version exposant la totalité de la zone de vol

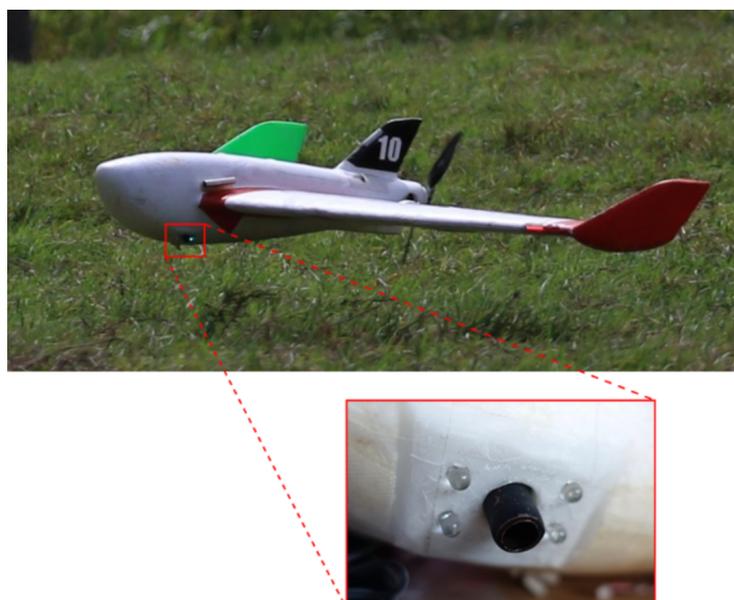


FIGURE 5.20 – Photo du drone SkyWalker X6 prise pendant la phase d’atterrissage d’un vol à la Barbade. La partie zoomée correspond au capteur de LWC utilisé pour détecter les nuages

pés d'un autopilote PPRZ, de sondes de pression/température/humidité, d'un modem longue portée, d'une batterie avec une autonomie maximale d'une heure et d'autres capteurs variant selon les UAVs. Ils embarquaient également un capteur d'extinction permettant de calculer la valeur du LWC pour la détection des nuages [Harrison 2014]. Un seul drone embarquait une sonde pitot à 5 trous permettant d'effectuer des mesures de champ de vent et n'a été utilisé que pour réaliser des profils verticaux.

5.2.2 Déroulement d'une opération de vol typique

Durant une opération typique d'exploration de nuage, le système nécessitait six opérateurs pour être déployé efficacement. L'équipe travaillait ensemble dans le but de déployer la flotte et de récolter des données intéressantes dans les nuages mais chacun avait un rôle différent :

- **Le pilote de sécurité (PS)** : Présent sur le terrain, il est le seul opérateur qui peut reprendre la main en mode manuel sur le drone si ce dernier se trouve à la portée de sa radiocommande. Il réalise également les opérations d'atterrissage et de décollage.
- **L'opérateur d'UAV (OpU)** : Derrière la station sol, il est responsable du contrôle de chaque drone. Il peut changer les drones de bloc du plan de vol, modifier certains paramètres affectant la stabilité, le réglage des seuils ou du filtre passe-bas. Globalement, il vérifie que le vol se déroule correctement et gère les situations inattendues. Il est également responsable du déclenchement du mode mission après s'être assuré que les éléments de la liste sont correctement initialisés.
- **L'opérateur météo (OpM)** : Présent derrière l'interface de CAMS spécialement développée pour les sciences de l'atmosphère, il surveille les diverses mesures des drones en temps réel. Lorsqu'il estime que le drone a traversé un nuage intéressant à échantillonner, il demande aux opérateurs de la cartographie de déployer un drone avec un schéma spécifique. Il est aussi en charge de l'étude des conditions météorologiques du jour ce qui lui permet de prédire l'arrivée potentielle de nuages.
- **Les opérateurs de la cartographie (OpC)** : Ces deux opérateurs sont également derrière des interfaces CAMS spécifiques. L'un a pour rôle de vérifier le bon déroulement des processus de cartographie qui sont basés sur des Gaussian Process Regression. L'autre doit interagir avec les opérateurs météo et d'UAV pour créer de nouveaux éléments de mission et leurs paramètres associés à ajouter à la liste et gérer le bon enchaînement des tâches.
- **Le superviseur de vol (SV)** : Présent derrière les autres opérateurs, il supervise la coordination entre eux. Il vérifie les nouvelles tâches à ajouter et valide si elles doivent être acceptées ou rejetées. Il est aussi en charge de la coordination avec les autres équipes présentes sur le terrain et dans le même espace aérien. Enfin, il est le point de contact pour les contrôleurs aériens.

Plusieurs types d'opérations ont été réalisées pendant cette campagne. Certaines d'entre elles n'ont servi qu'à tester et régler notre système, tandis que d'autres avaient pour but de collecter des mesures atmosphériques. Quelques missions réalisant des profils verticaux à des coordonnées fixes ont été accomplies mais la plupart des opérations consistaient à suivre l'évolution d'un nuage pendant son développement. Ces missions d'exploration des nuages ont été réalisées avec un ou deux drones. L'objectif initial était de réaliser un échantillonnage d'un nuage avec une flotte de cinq à huit drones mais la complexité d'opérer plusieurs drones sans algorithme de décision et de contrôle de la flotte a rendu cet objectif irréaliste pour la campagne.

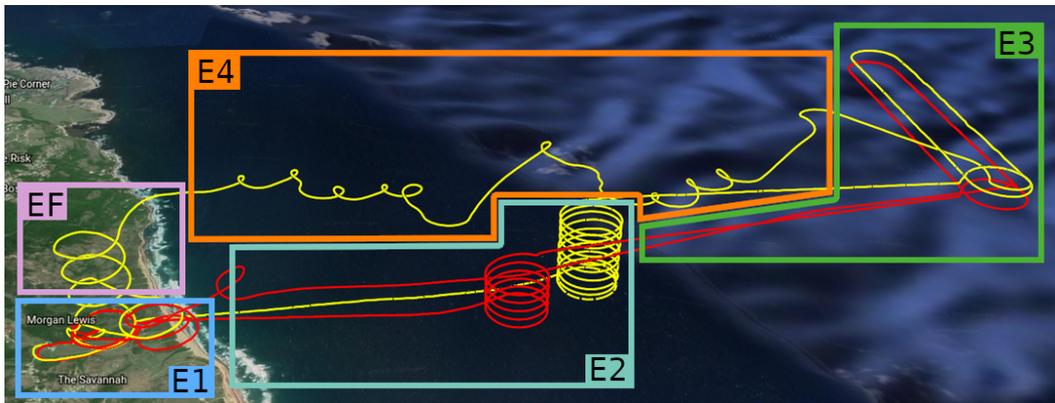


FIGURE 5.21 – Trajectoires 3D de deux drones effectuant une mission d'exploration et les étapes de l'opération. Le drone avec la trace jaune a effectué un suivi de nuage

La Figure 5.21 montre les trajectoires 3D de deux drones pendant un vol de la campagne et les étapes associées à chaque partie du vol. Cette vue est réalisée sur GoogleEarth à l'aide des fichiers KML générés à partir des enregistrements GPS des drones. La liste suivante détaille les différentes étapes d'une mission d'exploration d'un nuage avec une flotte du point de vue d'un drone. Elle contient également les actions réalisées par les opérateurs pour chaque étape :

- **Étape 1** : Décollage puis mise en attente sur un cercle le temps que tous les drones de la flotte aient décollé. (PS, OpU et SV)
- **Étape 2** : Déplacement de la flotte au large des côtes et montée en spirale jusqu'à une altitude désirée. L'altitude choisie est déterminée en fonction des conditions atmosphériques du jour et correspond à une valeur supérieure à la base des nuages. (OpU et OpM)
- **Étape 3** : Déplacement de la flotte jusqu'à la zone de recherche où intercepter les nuages. Réalisation du schéma *Hippodrome* à des altitudes différentes en attendant d'en croiser un. (OpU, textcolorDandelionOpM, OpC et SV)
- **Étape 4** : Si un nuage est détecté les opérateurs peuvent choisir de créer un nouvel élément de mission correspondant à un schéma adaptatif et ses para-

mètres associés. Une fois créé, le superviseur des vols vérifie les paramètres et le valide. Le drone suit ensuite la stratégie de navigation du schéma adaptatif. (OpU, OpM, OpC et SV)

- **Étape finale** : Retour des drones au dessus du terrain d'opération et descente en spirale pour finir sur une phase d'approche en automatique et un atterrissage en manuel. (PS, OpU et SV)

5.2.3 Données collectées et trajectoires résultantes des motifs de vol adaptatifs

Diverses mesures sont collectées tout au long du vol du drone mais la plus intéressante reste la valeur du LWC. La première partie de cette section se concentre sur la présentation des méthodes de filtrage et de seuillage de cette mesure pour réaliser la détection d'un nuage. La seconde partie expose l'approche choisie pour analyser les résultats obtenus lors de l'exécution des schémas adaptatifs dans un nuage, ainsi que des figures des trajectoires des meilleures explorations réalisées.

5.2.3.1 Filtrage des données du capteur de nuage

La première discussion de la section 4.1.4 sur le sujet de l'utilisation des mesures du capteur de LWC permet d'introduire cette section. Sur les premiers vols réalisés pendant cette campagne, les drones n'étaient pas équipés de filtre ni même de comparateur à hystérésis. Les premières observations sur les valeurs collectées à haute fréquence par le capteur de nuage ont montré que le signal était très bruité. Un premier filtre passe bas du première ordre a été rajouté afin d'exploiter au mieux cette mesure. Une fois le signal filtré, la détection du nuage se réalisait à l'aide d'un seuil qui a été amélioré en comparateur à hystérésis pour éviter de changer trop rapidement d'état (IN/OUT) avec le bruit important du capteur.

La Figure 5.22 expose la trajectoire de deux drones pendant une mission d'exploration et les graphes des valeurs du capteur de LWC associés. On peut remarquer que malgré le filtrage le signal reste assez bruité. Heureusement ce bruit résiduel n'empêche pas la méthode de détection. Sur la figure des trajectoires des drones en 3D, on remarque que le drone avec la trace jaune a effectué des schémas de vol qui correspondent à de l'adaptatif contrairement au drone avec la trace rouge. Le graphe du dessous à gauche prouve clairement que le signal du capteur de LWC du drone rouge n'est jamais passé au dessus du seuil d'entrée. A l'inverse, le graphe de droite montre que la valeur du signal est passée plusieurs fois au dessus du seuil d'entrée et en dessous du seuil de sortie, signe que le drone a traversé plusieurs fois le nuage.

Les schémas de vol adaptatifs sont actuellement totalement dépendants des mesures du capteur de LWC, le meilleur indicateur de la présence d'un nuage. Toutefois la seule approche qui a permis de valider les mesures du capteur consistait à comparer visuellement les données avec l'enregistrement de la vidéo embarquée. Afin d'utiliser au mieux cette valeur pour réaliser des détections, les paramètres du filtre ainsi que les valeurs des seuils étaient réglables à tout moment. Avant de partir en

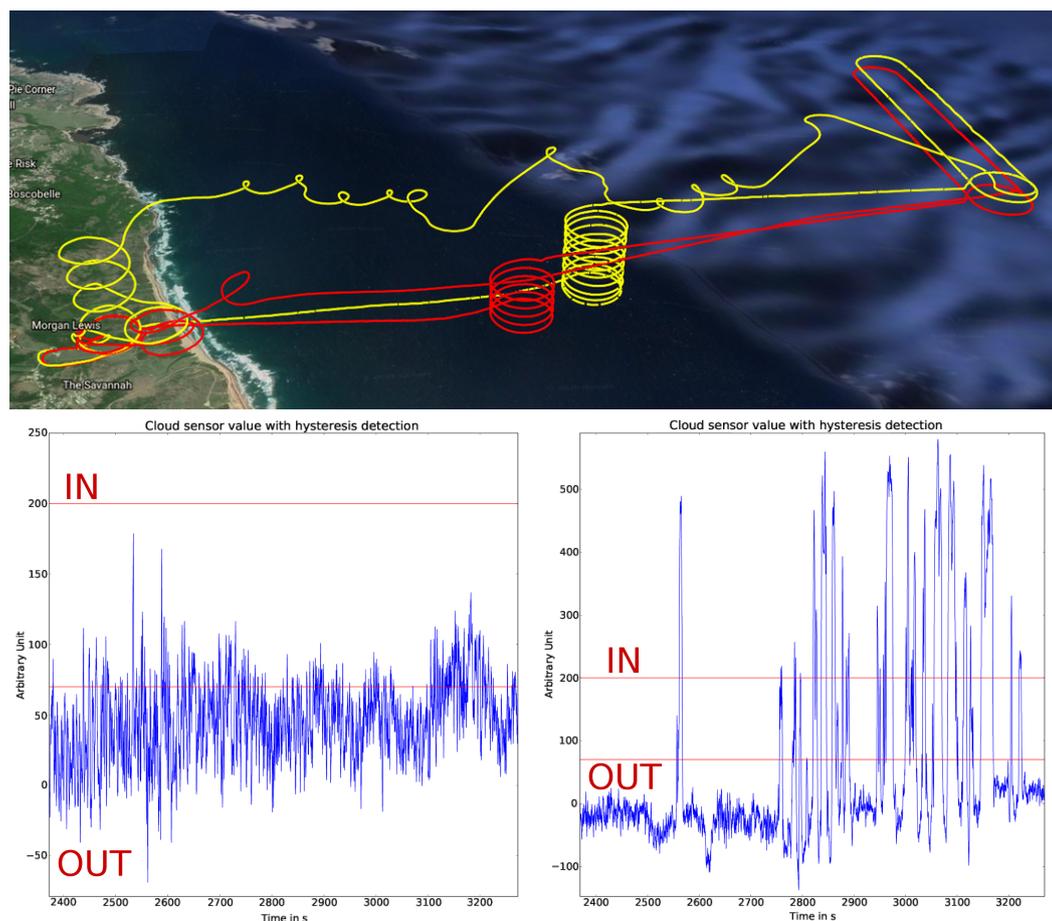


FIGURE 5.22 – Trajectoires d'un vol réalisées avec deux drones et graphes présentant les valeurs filtrées du capteur de nuage. La trace rouge est associée au graphe en bas à gauche et la trace jaune à celui de droite. Les traits horizontaux présents sur les graphes représentent les seuils de détection ; dépasser le seuil du haut conduit à la détection d'une entrée dans le nuage et descendre en dessous de celui du bas à une sortie.

vol, chaque drone avait des paramètres de filtrage initiaux, principalement associés aux observations des vols précédents. Pendant le vol, une fois le drone à l'altitude estimée des nuages, les paramètres du filtre étaient modifiés pour rendre le signal utilisable et les valeurs des seuils de détection étaient réglées par les opérateurs en fonction des observations sur les mesures en temps réel.

D'autres facteurs perturbateurs du signal ont été observés pendant la campagne. Par exemple, lorsque le drone effectuait des montées et consommait plus de puissance, le signal du capteur de nuage faiblissait. Ce phénomène venait principalement du fait que la carte d'acquisition du capteur utilisait la même alimentation que le drone. De même pour l'orientation du capteur par rapport au rayon du soleil qui jouait un rôle très important. Lors des vols en fin de journée, lorsque le soleil était bas dans le ciel, des rayons directs venaient saturer le capteur sur certaines phases de virage. Une première solution a été de déplacer les capteurs de nuage à 45 degrés vers le bas. L'autre moyen de palier ces deux problèmes était de jouer sur le réglage du filtrage et des seuils pour s'adapter au mieux aux conditions du vol.

5.2.3.2 Analyse des trajectoires résultantes d'exploration de nuage

La campagne à la Barbade a permis à l'équipe **NEPHELAE** de réaliser de nombreux vols. La plupart ont été réalisés avec des stratégies de vol adaptatives. L'idée est donc d'analyser toutes les données collectées par les drones afin de reconstruire des graphes correspondants aux trajectoires des drones. L'autopilote enregistre en temps réel pendant le vol une multitude de données sur un fichier de log. La composition du fichier est variable et réglable à l'aide d'un fichier de configuration. Dans le cas de la campagne, les données les plus intéressantes correspondent aux coordonnées GPS, aux mesures de **LWC** filtrées, aux différentes composantes du vent et finalement aux modes dans lesquels le drone se trouve.

La première idée est donc d'afficher les coordonnées GPS (latitude et longitude) sur un graphe afin de voir la trajectoire que le drone a effectué.

La Figure 5.23 montre le chemin emprunté par le drone lors d'un vol d'exploration d'un nuage avec un schéma adaptatif. Cette trajectoire correspond seulement à la section de vol présentant une stratégie d'exploration. Le point **bleu** est l'emplacement initial du drone lors du passage en mode *mission* et le point **rouge** l'emplacement final. La coloration de la courbe associée à la trajectoire est réalisée à l'aide d'une normalisation des valeurs du **LWC** en valeurs comprises entre 0 et 255. Chaque valeur est ensuite utilisée pour colorer le point GPS associé avec la palette de couleurs python nommée *cool*. Celle-ci propose un dégradé de couleur allant de cyan pour les plus basses valeurs à fuchsia pour les plus hautes en passant par du bleu foncé et du violet. Ainsi, une trajectoire colorée en fuchsia signifie que le drone est dans le nuage. Si elle est cyan, alors le drone se situe en dehors. Malheureusement, l'amplitude des valeurs de **LWC** n'est pas assez élevée pour faire apparaître d'autres couleurs dans le graphe après leur normalisation. Cette méthode de colorisation permet dans un premier temps de mieux apercevoir les passages du drone dans le nuage et donc d'estimer mentalement la position du nuage par rap-

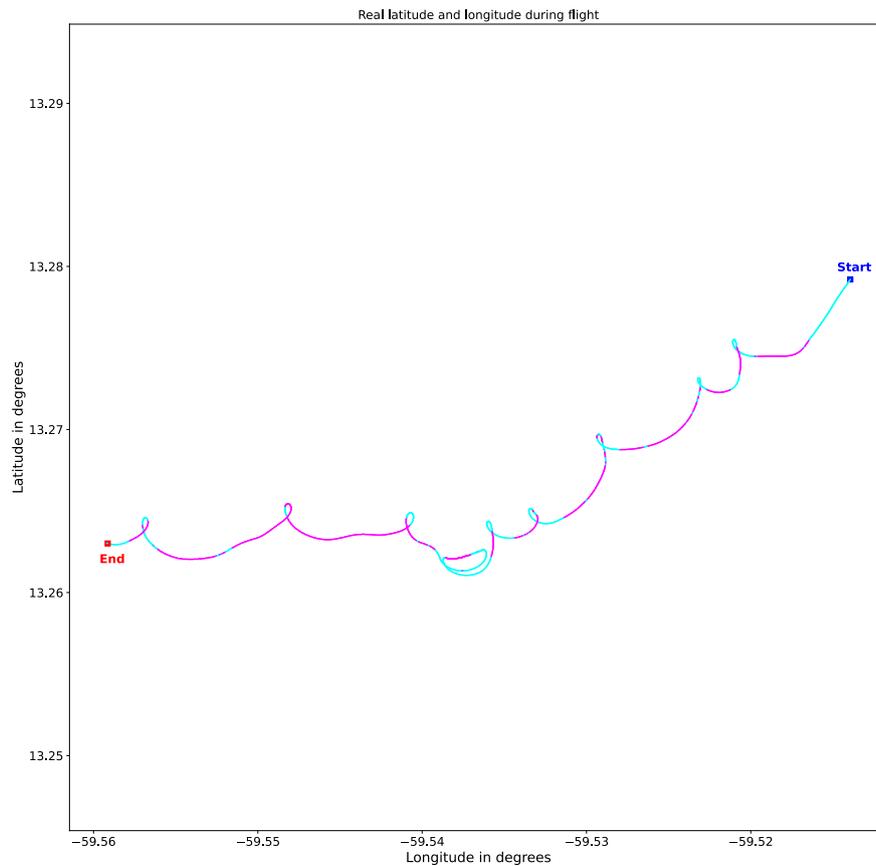


FIGURE 5.23 – Figure présentant la trajectoire d’un drone en latitude et longitude lors de l’exécution d’un schéma de vol adaptatif. La trajectoire est colorée selon la valeur de LWC (cyan/fuchsia = en dehors/dans le nuage)

port au drone. Toutefois, il est toujours très difficile de discerner quel schéma de vol adaptatif a été utilisé pour arriver à ce résultat.

L'hypothèse pour mieux comprendre ces résultats part du principe que les nuages ne se déplacent qu'à l'aide du vent environnant (phénomène d'advection). Le concept est donc de se servir du vent horizontal estimé par le drone pour corriger les coordonnées vues précédemment.

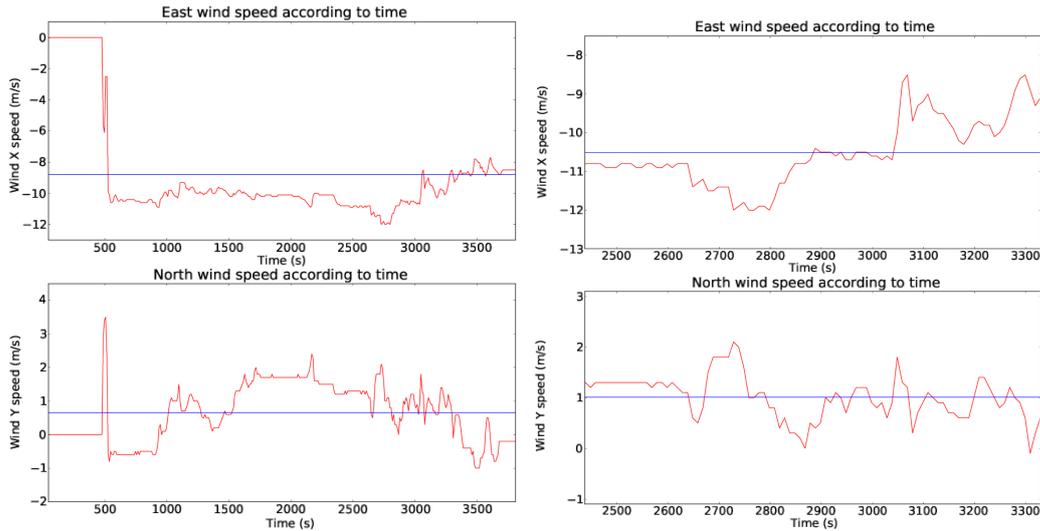


FIGURE 5.24 – Vent relatif estimé par le drone pendant un vol entier à gauche et une section du vol à droite

La Figure 5.24 montre le vent estimé par la station sol basé sur les coordonnées GPS du drone comme discuté dans [Mayer 2012]. Les valeurs du vent sont estimées selon deux axes : la composante Nord du vent (positive quand le vent vient du Nord et négative quand il vient du Sud) et la composante Est du vent (positive venant de l'Est et négative venant de l'Ouest). Sur les graphes de gauche on retrouve le vent estimé pour l'intégralité du vol, contrairement aux graphes de droite qui représentent le vent estimé pendant la section du vol où le drone était en exploration. Les lignes horizontales bleues correspondent à la valeur moyenne du vent calculée pour la composante.

La méthode permettant le calcul de la vitesse air du drone (et donc l'estimation de la vitesse du vent) converge vers une valeur proche de la réalité lors de virages. En revanche, en lignes droites les valeurs du vent deviennent incertaines. De plus, à la Barbade la vitesse et l'orientation du vent sont quasiment constants pendant une session de vol. Si l'on considère donc les incertitudes sur la mesure de la vitesse air et la faible amplitude du vent réel, il est préférable de choisir une vitesse moyenne plutôt que de corriger les coordonnées avec les valeurs locales de vent. D'autre part, seulement une portion du vol est prise en compte pour corriger les coordonnées et non pas le vol total. En effet on ne prend pas en compte le laps de temps après le décollage, phase nécessaire pour l'algorithme d'estimation du vent de converger vers une valeur correcte. De plus, sachant que l'amplitude du vent varie en fonction

de l'altitude, on ne considère pas non plus les valeurs avant d'arriver à l'altitude de référence des nuages. Pour ce vol, on peut voir que la vitesse moyenne du vent pour le vol total est de -9 m/s, là où le vent moyen pour la section est de -10,5 m/s. Cette différence n'impacte pas la correction des premières coordonnées du vol par rapport au point initial. En revanche, plus le point corrigé sera éloigné dans le temps du point initial et plus cette différence sera importante et perturbera donc la construction de la trajectoire corrigée. C'est donc pour toutes ces raisons qu'une valeur moyenne du vent sur une section de vol est considérée par la suite.

Le principe est donc de se servir de la première coordonnée enregistrée une fois que l'opérateur passe le drone en mode *mission* en tant qu'origine du repère créé. Ainsi il est possible de calculer les coordonnées du drone dans le repère du nuage en corrigeant les valeurs GPS avec le vent moyen précédemment estimé. Les équations suivantes présentent les calculs réalisés pour cette opération :

$$(X_i) = (Long_i - Long_0) \times R_T \times \cos(Lat_i) \quad (5.1)$$

$$(Y_i) = (Lat_i - Lat_0) \times R_T \quad (5.2)$$

avec $Long_0$ et Lat_0 qui correspondent à la longitude et latitude (en radian) du point d'origine choisi, $Long_i$ et Lat_i les coordonnées du point à corriger et R_T le rayon de la terre en mètres. Les valeurs de sorties résultantes (X_i et Y_i) sont donc les positions locales du drone dans le référentiel terrestre. L'opération suivante est de soustraire le vent relatif moyen estimé à ces valeurs :

$$(X_c) = X_i - (\overline{W_x} \times (T_i - T_0)) \quad (5.3)$$

$$(Y_c) = Y_i - (\overline{W_y} \times (T_i - T_0)) \quad (5.4)$$

avec X_c et Y_c qui représentent les positions locales du drone dans le référentiel du nuage. $\overline{W_x}$ et $\overline{W_y}$ sont associés aux valeurs moyennes de la vitesse du vent calculées pour chaque composante et enfin T_0 et T_i qui sont les temps de référence du point d'origine et du point actuel.

La Figure 5.25 illustre la méthode de correction des coordonnées du drone lors d'un vol d'exploration d'un nuage. Plus précisément, il s'agit d'une section d'un vol où un schéma adaptatif *Trinity* a permis de collecter des données dans un nuage. Le graphe de droite correspond au signal des mesures de LWC avec les seuils de l'hystérésis choisis pour le vol. L'image en haut à gauche présente la trajectoire non corrigée du drone dans le repère terrestre. On peut remarquer entre le graphe du LWC et la trajectoire colorée que le drone est passé plusieurs fois dans le nuage. Enfin la figure en bas à gauche représente la trajectoire résultante une fois les corrections effectuées avec les équations 5.1, 5.2, 5.3 et 5.4. Ce tracé est donc le chemin effectué par le drone dans le référentiel du nuage. À l'aide de cette méthode, la forme du schéma de vol est clairement visible et l'emplacement du nuage est observable. On peut remarquer que l'UAV effectue des trajectoires circulaires au niveau des bordures

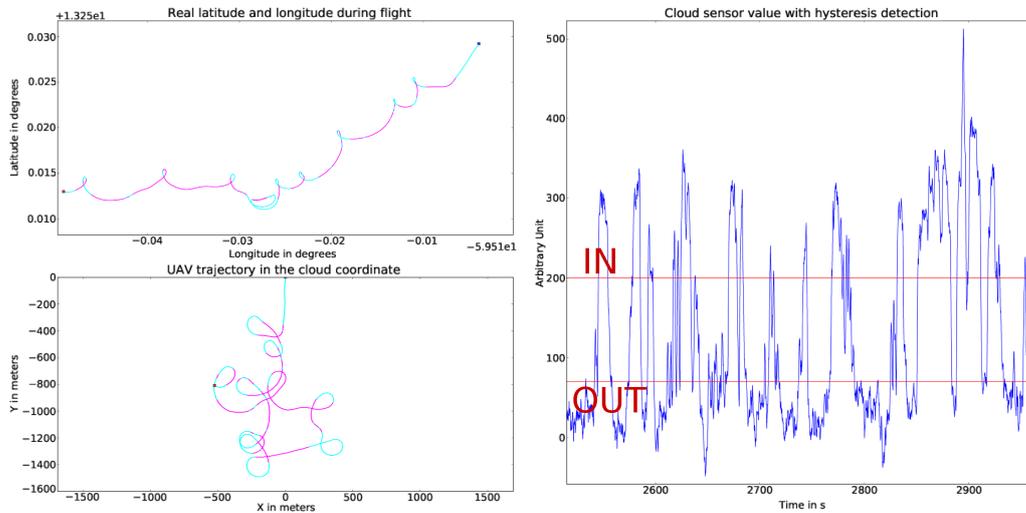


FIGURE 5.25 – En haut à gauche : graphe présentant les coordonnées latitude et longitude d’un drone pendant une portion d’un vol ; En bas à gauche : trajectoire de l’UAV dans le repères du nuages en mètres (cyan/fuchsia = en dehors/dans le nuage) ; A droite : valeur du capteur de LWC pendant la portion de vol

sans jamais changer de sens, ce qui correspond bien au schéma *Trinity*. Il faut tout de même rappeler que cette illustration représente la trajectoire du drone pendant un certain temps. Même si on obtient la trajectoire du drone par rapport au nuage, la composante temporelle n’est pas prise en compte dans ces représentations. Le nuage change de forme, le drone peut donc passer deux fois au même endroit sans pour autant détecter les deux fois un nuage.

Toutes les figures qui vont suivre présentent et illustrent les trajectoires dans le repère du nuage résultantes des schémas de vol adaptatifs pendant des sections de vol.

Les deux illustrations présentent dans la Figure 5.26 montrent les résultats obtenus pendant l’exécution de schéma *Trinity*. Ce schéma particulier étant plus robuste, il a été le plus utilisé pendant la campagne. De nombreux suivis de nuages ont été réalisés grâce à ce schéma, seulement quelques uns sont présentés. Pour ces deux résultats, on peut clairement voir que la stratégie du schéma a été respectée. A chaque fois que le drone est sorti du nuage, il a bien calculé son prochain centre de cercle et a réussi à y entrer de nouveau. Cependant, en fonction de la forme du nuage et de l’espace aérien autorisé limité, les drones pouvaient manquer de temps pour effectuer un tour complet du nuage. Dans certains cas, le drone se retrouvait bloqué sur un seul côté du nuage et n’arrivait pas à passer automatiquement de l’autre côté avec cette stratégie (par exemple dans le graphe du dessus de la Figure 5.26).

La Figure 5.27 montre la trajectoire empruntée par un drone lors d’un vol d’exploration avec un schéma adaptatif *Rosette*. L’UAV a traversé une première fois le nuage entièrement puis a commencé à effectuer un demi-tour en dehors du nuage. Malheureusement, lorsqu’il effectuait sa trajectoire circulaire pour entrer de nou-

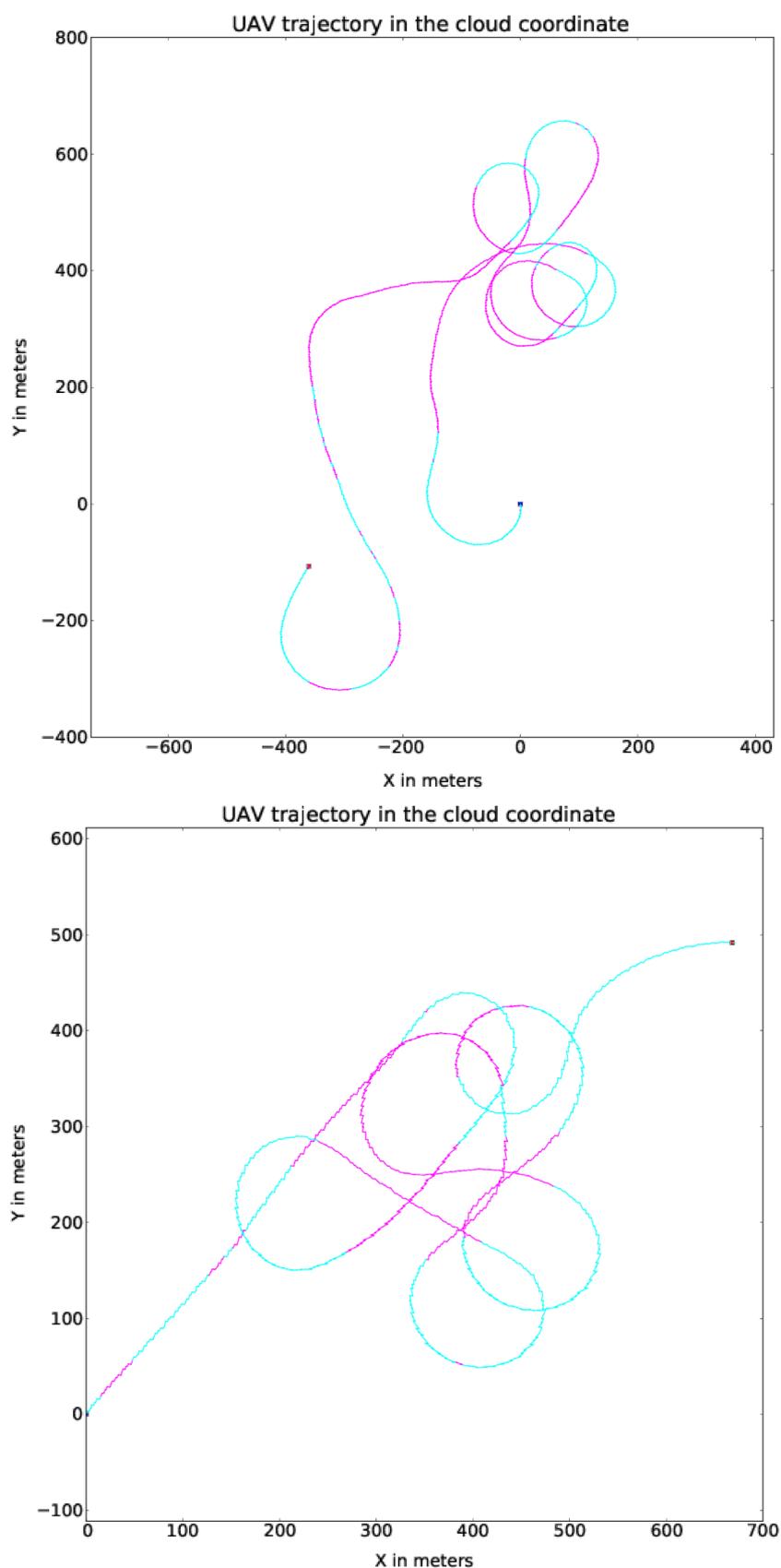


FIGURE 5.26 – Trajectoire d'un drone dans le repère du nuage provenant de l'exécution d'un schéma de vol adaptatif *Trinity* sur deux nuages différents (cyan/fuchsia = en dehors/dans le nuage)

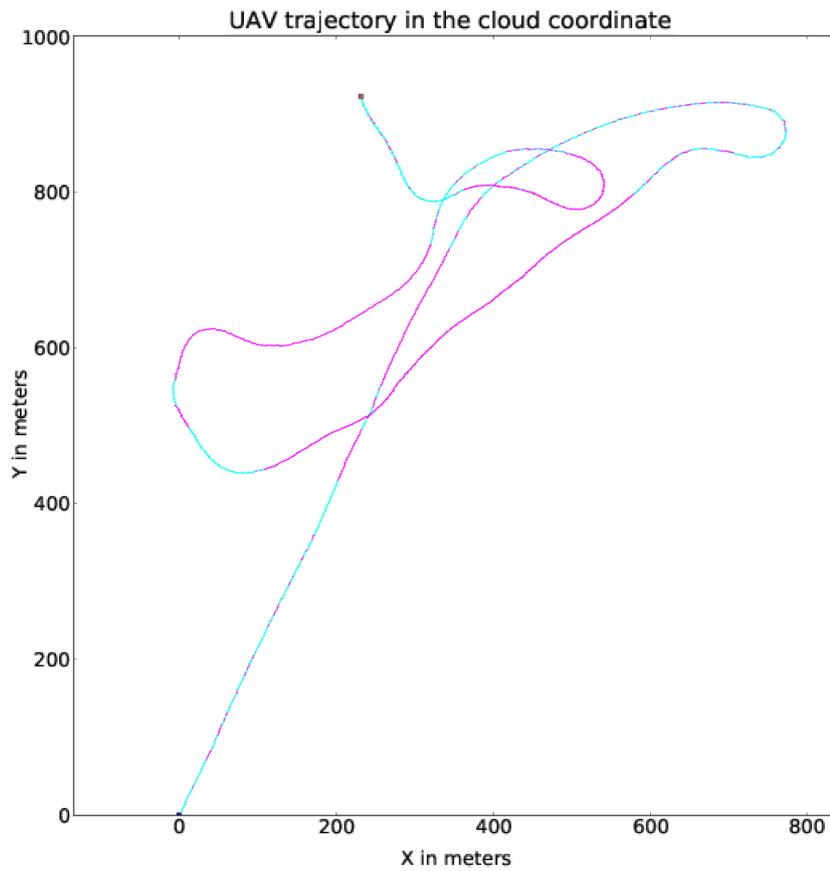


FIGURE 5.27 – Graphe présentant la trajectoire résultante du schéma adaptatif *Rosette* dans le repère du nuage (cyan/fuchsia = en dehors/dans le nuage)

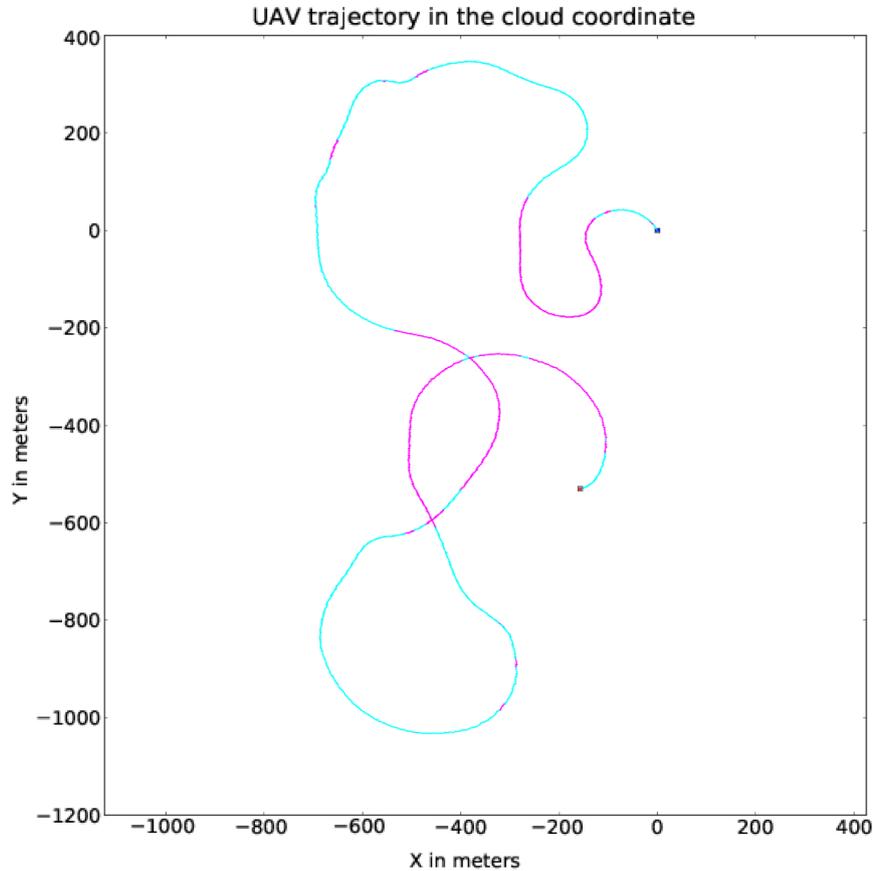


FIGURE 5.28 – Graphe présentant la trajectoire résultante du schéma adaptatif *Lace* dans le repère du nuage (cyan/fuchsia = en dehors/dans le nuage)

veau dans le nuage, le drone a été perturbé par des détections "d'entrée-sortie" très rapides, ce qui a causé une trajectoire très large (on peut d'ailleurs voir la trajectoire en haut à droite colorée de façon discontinue). Une fois de retour dans le nuage, le drone a été guidé par la mise à jour du centre du nuage estimé provenant de CAMS ce qui lui permet de le traverser une nouvelle fois. Le second demi-tour est plus significatif du comportement nominal de ce schéma adaptatif. Bien que ces résultats soient très encourageants, le manque de robustesse de cette fonction de navigation en terme de perte de suivi et d'efficacité à traverser le nuage font qu'il n'a pas été exploité autant qu'on le souhaitait.

La Figure 5.28 expose le résultat d'un schéma de vol adaptatif *Lace* réalisé pendant la campagne de vol. Les différents vols réalisés sur l'île ont permis de déployer ce schéma lors d'un seul et unique vol d'exploration très spécifique dans lequel le nuage détecté était d'une taille conséquente. Cette particularité était un moyen de



FIGURE 5.29 – Trajectoire KML de deux drones réalisant un échantillonnage sur le même nuage

s'assurer que le schéma de vol n'allait pas perdre le suivi après quelques minutes. Dans ce vol, l'opérateur a décidé de changer de stratégie d'exploration en plein milieu du suivi car il estimait qu'il allait obtenir de meilleurs résultats avec le schéma *Lace* sur un nuage de cette taille. Sur le début du tracé, le drone entre une première fois dans le nuage et tourne dans le sens horaire. Une fois sorti du nuage, il tourne dans le sens anti-horaire mais se retrouve perturbé par des bribes de nuages qu'il détecte et qui le forcent à suivre un cercle très large. Même si le suivi de ce nuage a été très rapide et que le nuage était plus petit que notre estimation, le comportement final du drone concorde parfaitement avec la stratégie développée pour ce schéma.

5.2.3.3 Résultats des vols multi-drones

Pendant la campagne, le système développé a permis de déployer plusieurs drones en même temps en vol. L'objectif de base était de déployer une flotte de quatre à cinq drones dans le même nuage, tous exécutant un schéma de vol adaptatif ou géométrique pour collecter des données dans des zones différentes. L'idée était de commencer avec un drone puis d'augmenter leur nombre progressivement. Cependant, le temps a manqué pour développer des algorithmes de contrôle de flotte et de décision collective pour le système. De plus, la déconfiction des drones en vol était réalisée manuellement par l'opérateur derrière la station sol. Pour un maximum de sécurité, l'opérateur des drones et le superviseur des vols essayaient de respecter une trentaine de mètres d'altitude d'écart entre chaque UAV et veillaient en continu à ce que cette contrainte soit respectée. C'est principalement pour ces raisons que la majeure partie des vols ont été réalisés avec seulement deux drones.

Bien que de nombreux vols mettaient en place deux drones dans les airs pour réaliser l'exploration d'un nuage, seulement deux vols ont complété cet objectif. La Figure 5.29 expose les trajectoires 3D de deux drones (un en rouge et l'autre en jaune) sur GoogleEarth à l'aide des coordonnées GPS enregistrées pendant ces vols. L'illustration du dessus montre un vol où deux drones ont détecté et exploré des

nuages différents en même temps. Cela prouve tout d'abord la faisabilité de déployer plusieurs drones pour réaliser des missions d'exploration sur des zones différentes. Le second vol sur l'image du dessous représente certainement le vol le plus important de la campagne. Ce dernier a permis à l'équipe de déployer deux drones exécutant des schémas de vol adaptatifs simultanément dans le même nuage. Voici comment on peut décrypter ce vol :

- Le drone jaune est monté en spirale à une altitude supérieure que le drone en rouge. On peut le vérifier notamment avec l'étape 2 où il effectue plus de cercles que le rouge.
- Une fois arrivé dans la zone de recherche, le drone jaune a une légère avance sur le drone rouge. Cependant, c'est le drone rouge qui détecte en premier la présence d'un nuage.
- Les opérateurs ont aussitôt basculé le drone rouge en mode *mission* avec l'exécution du schéma adaptatif *Trinity*.
- Une fois que les opérateurs ont vérifié que le drone rouge arrivait bien à suivre le nuage, ils ont passé le drone jaune en mode *mission* avec le même schéma d'exploration et en réglant les paramètres du schéma en fonction des observations faites sur le drone rouge.
- On peut voir après quelques temps que le drone jaune a rattrapé le rouge et a commencé son exploration dans le même nuage.
- A un certain moment, les deux drones se sont égarés et les opérateurs ont dû reprendre la main pour les renvoyer dans le nuage ciblé.

Ce qui est très intéressant sur ce vol, mais pas forcément représentatif avec les trajectoires KML, c'est que le drone rouge explorait la partie avant du nuage quand le drone jaune collectait des données sur la partie arrière. C'est exactement pour ce genre d'application que le système a été développé et même si sur la totalité de la campagne il n'y a eu qu'un seul vol comme celui-ci, la faisabilité et l'utilité du système est prouvée.

Le déploiement de plusieurs UAVs proches les uns des autres et dans un espace aérien restreint demande une forte concentration et une adaptation rapide de la part de l'opérateur. La surcharge d'attention engendrée par ce genre d'opération rend la tâche de contrôle de flotte très épuisante et la moindre inattention peut conduire à un crash.

5.2.4 Résumé de la campagne

Cette campagne de vols expérimentale à la Barbade a permis à l'équipe de NEPHELAE de réaliser un grand nombre de vols dans un environnement où les nuages se développent naturellement. La totalité des vols a été enregistrée et ces vols peuvent être rejoués à tout moment à l'aide des outils proposés par PPRZ. D'un point de vue météorologique, les scientifiques de l'atmosphère utilisent encore aujourd'hui les mesures collectées pendant la campagne pour construire leurs nouveaux modèles d'évolution des nuages. C'est un long processus que d'analyser et

traiter ces données pour établir des relations entre les différents composants micro-physiques régissant l'évolution d'un nuage.

TABLE 5.3 – Tableau récapitulant les vols réalisés pendant la campagne expérimentale à la Barbade avec l'équipe **NEPHELAE**

Nombre de vols	48	22 vols réalisés avec deux UAVs en même temps.
Données enregistrées	45 heures	Temps de vol moyen autour des 53 minutes par vol.
Vols de calibration	23	Calibration des UAVs, du capteur de nuage et réglage des paramètres de filtrage. Validation des schémas de vol adaptatifs.
Vols de mesures	25	Mission de profils verticaux ou de suivis de nuages.
Vols utilisables et intéressants	18	Vols présentant un temps de suivi du nuage supérieur à 2 minutes. Temps moyen de 5 minutes par suivi.

Le Tableau 5.3 présente un résumé de la campagne en quelques chiffres. Sur une période de trois semaines, l'équipe a réalisé environ 48 vols, soit plus de deux vols par journée, générant ainsi l'équivalent de 45 heures de fichier de log. La complexité de déployer plusieurs drones en même temps se ressent par ce nombre de 22 vols en multi-drones. Sur ce total de 48 vols, 47% étaient des vols de calibration des drones ou des capteurs et 53% des vols de collecte de mesures. Sur ce nombre de vols de mesures, 72% sont des vols intéressants car ils présentent un bon suivi et offrent donc des mesures remarquables pour les scientifiques de l'atmosphère.

Pour finir cette section et ce chapitre, j'aimerais revenir sur un certain nombre de problèmes que nous avons rencontré pendant la campagne et qui ont amené diverses réflexions sur les améliorations et les modifications à apporter au système pour qu'il devienne encore plus efficace :

- Au début de la campagne, le capteur de nuage était très bruyé. Un filtre passe bas, un filtre médian et un comparateur à hystérésis ont été ajoutés à la suite des premières expérimentations pour pallier ce problème.
- En mode *Recherche*, le drone déclenchait la suite de sa stratégie d'exploration sur un nuage détecté qui ne correspondait pas au nuage ciblé initialement. Ce genre de problème entraînait le ciblage et le suivi d'un nuage non désiré.
- Lorsque le drone était dans son fonctionnement nominal de l'exécution d'un schéma adaptatif, il arrivait qu'il détecte des petits bouts de nuages qui traînaient au niveau de la frontière. Cela conduisait généralement à une grosse perturbation dans la stratégie d'exploration du schéma, entraînant une perte du suivi du nuage ou un guidage sur une trajectoire plus longue que prévue.
- Un mauvais choix sur le premier point de calcul (sens de calcul et définition du sens de rotation) pouvait conduire le drone à l'arrière du nuage, là où il

était plus susceptible de perdre son suivi. En effet l'objectif était de choisir ce paramètre en fonction des observations des opérateurs de sorte à ce que le drone parte de l'arrière du nuage et remonte progressivement vers l'avant (le sens du nuage étant défini par la provenance du vent relatif qui le pousse à se développer et se déplacer.)

- Le plus gros problème rencontré a été les situations dans lesquelles un drone se retrouvait bloqué dans un état d'exploration indéfiniment (en dehors ou dans le nuage). Ce genre de blocage conduisait le drone à perdre le suivi du nuage. Ce problème majeur pouvait être corrigé par les opérateurs qui devaient alors relancer un nouvel élément de mission basé sur les récentes observations du nuage visé. Cependant cette opération étant longue à réaliser, devenait très complexe avec l'augmentation du nombre de drones dans la flotte.

Voilà maintenant presque un an que cette campagne s'est déroulée et que les scientifiques de l'atmosphère ont travaillé sur l'analyse et le post-traitement de la totalité des mesures collectées. Leurs toutes premières impressions à la fin du séjour étaient que le nombre de vols et de données collectées n'étaient pas suffisants. Les problèmes rencontrés sur les différents aspects de notre système ont conduit à de nombreuses erreurs qui n'avaient pas été prises en compte avant le départ. Cependant ils considéraient que les schémas de vol adaptatifs étaient tout de même très prometteurs. Après plusieurs mois d'analyse des résultats, les scientifiques de l'atmosphère sont revenus sur leurs premières observations, et ont communiqué sur deux faits importants. Premièrement, le grand nombre de vols effectués avec le schéma de vol *Trinity* a permis de récolter beaucoup de mesures au niveau de la bordure des nuages. En étudiant ces données, les météorologues ont réussi à constater et prouver un phénomène atmosphérique qui n'avait été observé pour le moment qu'en simulation ! Ensuite, il semblerait qu'aucun échantillonnage avec deux drones en simultanés (dans le même nuage) n'avait été encore effectué. Le vol présenté dans la section 5.2.3.3 peut donc être défini comme une première mondiale.

5.2.5 Les améliorations post-campagne

A la suite de cette campagne et après avoir analysé les résultats obtenus, plusieurs améliorations des schémas de vol adaptatifs ont été pensées et implémentées dans la logique des fonctions de navigation *Lace*, *Rosette* et *Trinity*. On peut identifier trois grandes améliorations sur l'ensemble des schémas qui permettent de contrer les comportements anormaux survenus pendant la campagne et d'améliorer la robustesse des stratégies d'exploration. Chacune de ces améliorations sont présentées pour le schéma de vol *Lace* à l'aide de schémas théoriques de la trajectoire du drone dans l'état actuel du code et dans l'état amélioré. Les résultats en simulation seront apportés dans un futur proche prouvant ainsi que les améliorations sont bien intégrées dans le système.

La première amélioration intervient sur la non détection du nuage si le drone ne se trouve pas à une distance minimale du point ciblé dans le premier état du logigramme (*Recherche*). On peut voir l'effet de cette amélioration avec le nuage jaune

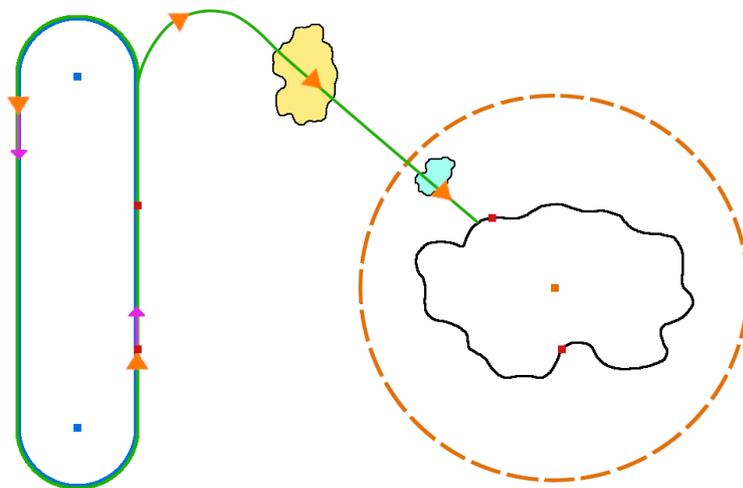


FIGURE 5.30 – Schéma de la trajectoire d'un drone avec les améliorations sur la distance de détection et le temps minimal pour valider une détection

de la Figure 5.30. Elle provient des observations faites lorsque le drone rencontrait un nuage imprévu le poussant à passer automatiquement dans l'état *ExplorationIn* et à explorer ce nuage non désiré. Cette amélioration pourrait améliorer la stratégie globale d'exploration puisqu'elle permettrait d'être sûr d'explorer le nuage souhaité. Cependant, la taille du nuage n'étant connue que lors de la première traversée du drone, le choix de cette distance minimale qui définirait un cercle d'un certain rayon est un paramètre délicat à choisir. Un rayon trop petit entraînerait un blocage du drone l'intérieur du nuage dès le début. Trop grand, cette amélioration n'aurait aucun effet.

La seconde amélioration porte sur le temps passé dans ou en dehors du nuage avant de déclarer la détection d'un point de bordure. On peut voir l'effet de cette amélioration avec le nuage bleu de la Figure 5.30. Il s'agit là d'un hystérésis non pas sur la valeur du *LWC* mais sur le temps pendant lequel la valeur courante dépasse ou est en dessous des valeurs de seuils choisies. Cette amélioration est née directement des erreurs dans les schémas de vol rencontrés pendant la campagne. Lorsque le nuage à explorer est entouré de petits bouts de nuages (qui se sont détachés) ou encore lorsque le nuage possède une géométrie assez difforme (par exemple avec des bras assez fins), le drone peut se retrouver plus ou moins perturbé par des détections très rapides dans l'exécution de son schéma. Pour contrer ces situations, le principe serait d'ajouter au module de détection un laps de temps entre le dépassement d'un seuil et la validation de la détection. Ce temps serait paramétrable et choisi selon les observations réalisées sur les nuages précédents. Encore une fois, ce changement entraînerait certainement des effets de bords non prévus. Ce paramètre en particulier retarderait la détection des bordures du nuage et pourrait donc avoir un impact sur

la réactivité des drones pendant l'exécution des schémas de vol adaptatifs.

Pour finir, la dernière amélioration concerne la mise en place d'un nouvel état dans la logique des schémas de vol. En effet, pendant la campagne et lors des phases de simulation dynamique, on a pu remarquer que si le vent fournit au schéma de vol adaptatif n'est pas assez précis en comparaison du vent réel, les fonctions de navigation guident les drones de plus en plus loin du nuage. Cette situation est principalement liée au fait que le vent paramétré pour les schémas est ensuite utilisé pour déplacer le repère du drone. Dans le cas où ce vent est bien estimé et bien réglé, le drone peut donc suivre la logique de son schéma tout en restant dans la zone du nuage. Mais dans le cas d'une trop grande différence, le drone diverge très vite de la zone d'exploration. En simulation dynamique on a d'ailleurs remarqué que c'était le principal cas d'erreur pouvant conduire à une perte du suivi. Cependant, pour arriver à ces cas particuliers, il faut tout de même inclure une erreur conséquente sur le vent paramétré. L'idée est donc de créer un nouvel état appelé *Recover* qui permettrait de débloquent le drone d'un état. Typiquement, si le drone serait bloqué à l'intérieur du nuage pendant plus d'un tour de cercle, il passerait dans l'état *Recover* et plus particulièrement le *RecoverIn* qui se servirait du point de décollage du drone comme repère pour sortir du nuage. Dans la situation où le drone se retrouverait bloqué à l'extérieur du nuage (comme sur les trois premières images de la Figure 5.31), la stratégie de récupération (*RecoverOut*) serait plus compliquée. Le but serait d'utiliser le dernier point de bordure détecté pour effectuer un cercle d'un rayon variable (comme l'illustre la dernière image de la Figure 5.31). Le facteur de croissance, ainsi que le rayon minimal et maximal du cercle seraient paramétrables et permettraient de retrouver le nuage après une perte de son suivi.

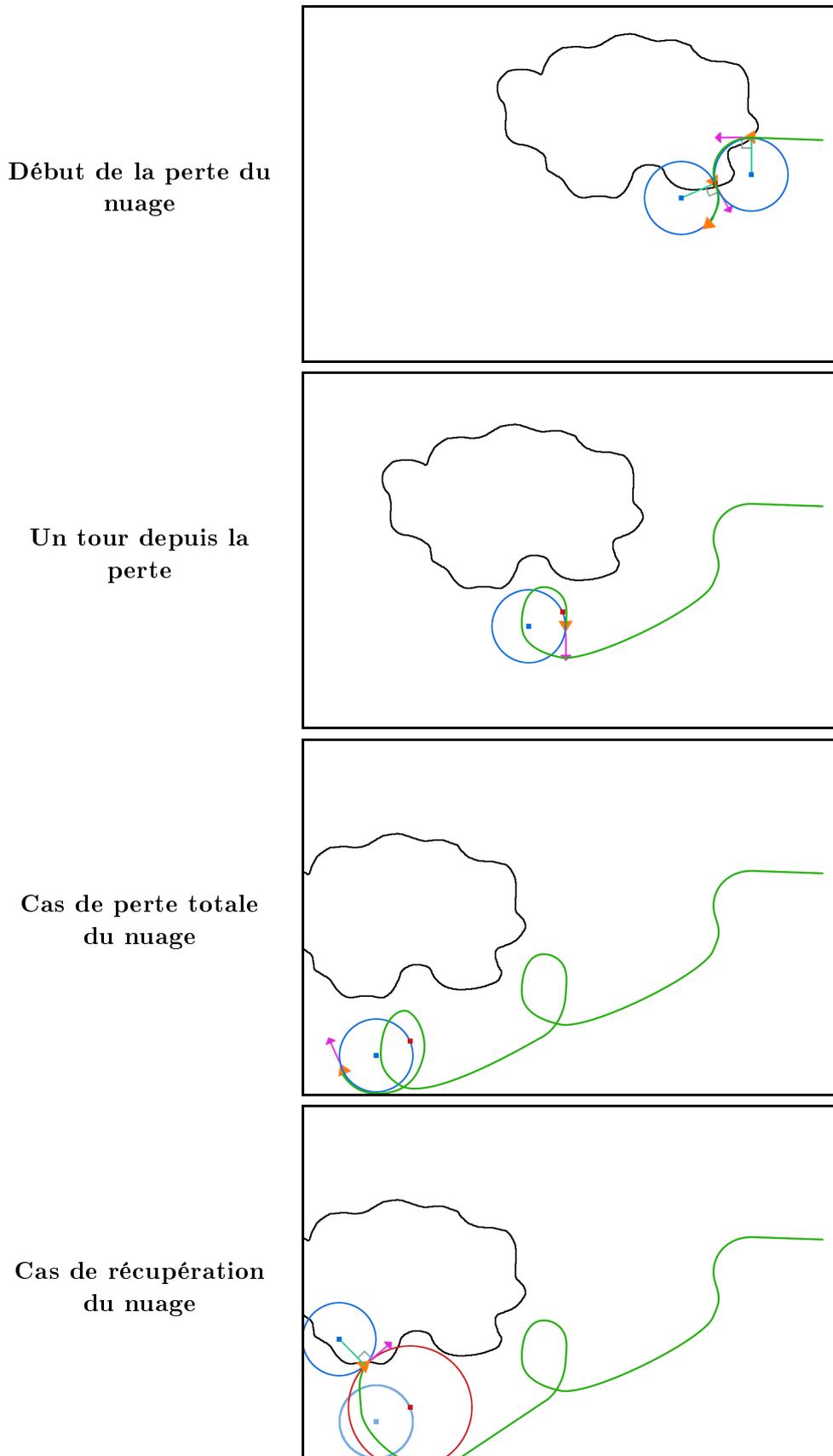


FIGURE 5.31 – Figure présentant des schémas des cas d'erreur dans lesquels le drone est en avance dans le nuage, et le cas d'une stratégie de récupération réussie

Discussions et perspectives

Contents

6.1 Discussions	125
6.1.1 Les schémas de vol adaptatifs pour l'exploration d'environnements inconnus dynamiques	125
6.1.2 L'architecture développée du système	127
6.2 Perspectives	128

6.1 Discussions

6.1.1 Les schémas de vol adaptatifs pour l'exploration d'environnements inconnus dynamiques

La principale problématique de l'exploration d'un environnement dynamique avec un système robotique réside dans le fait qu'explorer et échantillonner un tel environnement est une tâche très difficile. D'autant plus si les paramètres initiaux du phénomène ne sont pas connus et que les modèles déjà construits pouvant servir à mieux l'étudier ne sont pas encore assez précis. L'objectif majeur est alors de développer des stratégies d'exploration couplées à des fonctions de navigation capables de mener les agents d'un groupe de robots ou de drones à collecter des données de ce phénomène dynamique. L'utilisation de schémas de navigation classiques basés sur des positions GPS et des formes géométriques est possible dans de telles situations mais impose une contrainte trop grande à l'opérateur quand il s'agit de déployer plusieurs entités en simultané. Les méthodes et approches mises en place dans les travaux de [Sinha 2009] et de [Saldana 2017] ont été une grande source d'inspiration pour le développement de nouveaux schémas de vol spécifiques à l'exploration dynamique. Dans ces deux articles, les auteurs déploient une flotte de drones ou de robots pour explorer et déterminer la frontière d'un phénomène évoluant dans le temps. Ils prouvent alors en simulation que plusieurs agents peuvent se déplacer sur le même plan tout en s'échangeant des informations afin de planifier au mieux leurs trajectoires. Pour notre projet, la répartition des drones a été choisie de façon à couvrir plusieurs zones en même temps afin de collecter des mesures dans l'ensemble du phénomène en 3D. De plus, les fonctions de navigation développées se basent principalement sur la détection et la réaction pour s'adapter au phénomène là où les autres travaux utilisent majoritairement les observations des autres

agents. Enfin, le caractère expérimental de *NEPHELAE* a poussé à implémenter des méthodes réalisables qui prennent en compte les différentes contraintes de ce genre de mission : communications fortement contraintes, capteurs bruités, puissance de calcul limitée. . .

Les schémas de vol adaptatifs *Lace*, *Rosette* et *Trinity* sont tous basés sur l'utilisation de fonctions de navigation plus classique (GoTo et Cercle) ce qui permet de s'assurer que les trajectoires générées sont réalisables. Les résultats apportés pendant les simulations statiques dans un simulateur assez proche de la réalité prouvent que les drones sont capables d'explorer un nuage avec des stratégies différentes et que les données collectées permettent de reconstruire une carte similaire au nuage. En appliquant alors des paramètres de vent aux fonctions de navigations on offre la possibilité au drone de déplacer sa zone d'exploration et de continuer son échantillonnage malgré la dynamique du nuage. Les simulations dynamiques apportent la preuve que les drones sont aptes à suivre l'évolution du nuage pendant sa durée de vie totale avec cette méthode. Pour finir, les résultats obtenus lors de la campagne de vol à la Barbade illustrent bien le fait que ces nouvelles approches d'exploration adaptatives sont pertinentes pour cartographier un nuage réel.

Pour notre projet, le but est de déployer une flotte de drones sur différentes zones avec des stratégies d'exploration différentes. De ce point de vue, les spécificités de chaque schéma de vol adaptatif se dégagent assez fortement avec les quelques statistiques calculées dans le chapitre 5. Les hypothèses que l'on peut faire sur ces chiffres et sur les observations des trajectoires sont les suivantes :

- Le *Lace* semble être le schéma le plus adapté pour l'exploration rapide de la bordure du nuage. Cependant, il n'est efficace que sur des nuages d'une taille suffisante et il ne permet pas de collecter beaucoup de données dans le nuage comme le montre les pourcentages de temps passé à l'intérieur.
- Le *Rosette* apparaît clairement comme le schéma le plus délicat à mettre en place mais également comme celui qui offre la meilleure reconstruction du cœur du nuage. Le temps passé à l'intérieur du nuage en est la preuve. En revanche, le nombre de points de bordure est très faible en comparaison des autres schémas.
- Le *Trinity* est finalement le plus surprenant de tous les schémas. Développé de base pour palier au problème du *Lace* sur les petits nuages, il montre en simulation qu'il possède de grands atouts. En effet de part sa géométrie particulière, il permet à la fois d'explorer efficacement l'intérieur du nuage tout en collectant un grand nombre de points à sa bordure, ce qui fait de lui le candidat idéal pour réaliser un échantillonnage complet de nuages de plus petite dimension. Toutefois on peut remarquer dans les résultats des simulations que la carte reconstruite du nuage est moins précise que sur les autres schémas et que le temps pour effectuer un tour du nuage est plus long.

La réactivité et le côté adaptatif des schémas de vol sont totalement basés sur le franchissement de seuils de la valeur du capteur servant à détecter le phénomène dynamique à échantillonner. Le choix de ce capteur et du signal qu'il produit a

donc un impact très important sur le bon fonctionnement des différentes stratégies d'exploration. Lors de notre campagne de vol, les capteurs utilisés affichaient un signal avec un faible rapport signal-à-bruit. Malgré l'implémentation de filtres et de seuils à hystérésis, la mesure du capteur restait très difficile à exploiter pour les schémas de vol. Une grande partie des erreurs dans les trajectoires des drones que l'on a pu observer pendant les vols lors de l'exploration de nuages proviennent probablement du capteur.

La seconde composante responsable d'un blocage ou d'une perte du suivi du nuage provient du vent appliqué au schéma de vol. Il a été mis en évidence lors des simulations que ce choix peut conduire à des erreurs et c'est un problème responsable de nombreuses pertes lors des vols à la Barbade. Cependant, l'estimation du vent sans capteur dédié est un calcul délicat qui entraîne certes de légères différences avec le vent réel mais qu'il faut réussir à prendre en compte dans la stratégie d'exploration.

Même en tenant compte de ces deux composantes, les résultats obtenus lors de la campagne de vol sont satisfaisants. Les nouveaux schémas de vol adaptatifs ont permis de collecter des données très intéressantes pour les scientifiques de l'atmosphère. L'analyse de l'ensemble des mesures les ont notamment amenés à confirmer des phénomènes sur l'évolution des nuages qu'ils n'avaient jusque là observé qu'en simulation. De plus les drones sont totalement autonomes pendant l'exécution de leur schéma, ce qui permet alors à l'opérateur de déployer plus facilement plusieurs drones dans le même nuage. Le vol d'exploration simultané de deux drones à des altitudes différentes prouve la faisabilité d'une telle opération. Réaliser ce genre de mission est complexe à mettre en place mais reste une innovation en terme d'échantillonnage de nuage.

En ce qui concerne les applications de ces nouveaux schémas de vol, il faut rappeler qu'ils ne sont ni liés à la structure du drone, ni aux phénomènes atmosphériques à observer. Dans le projet [NEPHELAE](#) l'objectif était de collecter des données dans un cumulus. Mais je pense que l'ensemble des schémas auraient également un intérêt lors de missions d'exploration de panaches de fumée, d'exploration de polluants atmosphériques ou de toute autre application de cartographie de phénomènes dynamiques. Les seuls éléments à modifier seraient le module de détection et le capteur associé.

6.1.2 L'architecture développée du système

La seconde problématique de cette thèse est axée autour de la création d'une architecture distribuée pour réaliser des missions d'exploration et de cartographie d'environnements dynamiques. De ce côté, la difficulté majeure réside dans l'intégration de différents éléments logiciels permettant des fonctionnalités variées au système. On a pu voir dans l'état de l'art que les architectures distribuées peuvent prendre différentes formes et qu'elles nécessitent de mettre en place différents algorithmes spécifiques. Les méthodes et approches des travaux cités montrent qu'il est important de bien construire son architecture pour effectuer efficacement des

missions avec plusieurs agents (robots ou drones).

Les objectifs de la thèse étaient de mettre en place une architecture distribuée alors que le projet *NEPHELAE* n'avait pas cette ambition. Le développement des schémas de vol adaptatifs était un objectif commun, c'est pourquoi la principale contribution a été sur ces fonctions de navigation et non sur l'élaboration d'une architecture plus complexe. L'architecture du système *NEPHELAE* est aujourd'hui considérée comme centralisée mais elle a tout de même été créée dans l'optique de rajouter un jour des éléments la rendant alors distribuée.

Bien que cette dernière ne soit pas distribuée, cela n'empêche qu'elle remplit toutes les fonctionnalités cruciales pour permettre le déploiement d'une flotte de drones et réaliser la cartographie d'un environnement dynamique. On a pu voir en simulation et dans la réalité que le système *PPRZ* permet la bonne gestion de la communication et du relais des messages Air-Sol ou Sol-Sol. Il permet également de contrôler les drones pendant toute la durée de leurs missions notamment avec les fonctionnalités de plan de vol et de mode mission. Pour ce qui est de la cartographie, le système *CAMS* a prouvé son utilité dans la reconstruction des cartes de nuage avec les processus de régression gaussiens même si dans certains cas les paramètres de l'algorithme sont à modifier pour espérer une meilleure reconstruction (cas du *Trinity* en statique). De plus, *CAMS* a largement rempli son rôle en tant qu'interface de contrôle des données météorologiques et dans sa gestion des éléments de mission. Pour finir, il apporte un avantage considérable dans la mise en place de simulations réalistes grâce à l'utilisation de fichiers MesoNH pour simuler un environnement nuageux dynamique dans lequel réaliser des tests.

En comparaison des travaux précédents ([*Reymann 2018*], [*Bailon-Ruiz 2017*]), l'architecture a principalement évolué au niveau du système de cartographie et de la mise en place de modem longue portée. L'architecture distribuée conceptuelle présentée dans le chapitre 3 est plus complexe et permettrait de rendre le déploiement de la flotte encore plus autonome, mais l'implémentation des algorithmes nécessaires n'a pas pu être réalisée à temps.

Pour conclure sur l'architecture, on peut dire que les ambitions de la thèse étaient grandes comparées au temps de développement disponible. Cependant, réfléchir de façon distribuée permet de s'assurer que le système pourrait être amélioré avec différents algorithmes pour le rendre plus autonome. Encore une fois, il me semble que l'ensemble de cette architecture ne trouve pas seulement sa place dans l'exploration des nuages. Le système *PPRZ* ainsi que le système *CAMS* pourraient tout aussi bien être utilisés pour des applications d'exploration des fronts de feux de forêt, des panaches de fumées polluantes ou encore dans l'exploration d'une flaque d'huile marine.

6.2 Perspectives

Les schémas de vol adaptatifs ont montré à travers les différents tests en simulation et en réalité qu'ils étaient capables de guider le drone dans le nuage pendant la

totalité de sa durée de vie. Bien que cet objectif peut être validé, il reste encore de nombreux développements à réaliser pour rendre ces nouvelles stratégies d'exploration totalement robustes. Les perspectives pour le futur de cette thèse se regroupent principalement en trois grandes catégories.

Tout d'abord les améliorations sur la contribution principale de cette thèse, le développement de nouvelles fonctionnalités pour les schémas de vol adaptatifs :

- Un travail important serait de rendre le schéma conique oblique adaptatif. Pour ce faire, il faudrait trouver et implémenter des méthodes efficaces pour estimer le maximum local de vent ascendant pour ensuite s'en servir comme point de cercle sur lequel le drone réaliserait une spirale (montante ou descendante).
- La seconde idée serait de se servir des différents paramètres du vecteur d'état du drone et du vent pour paramétrer le schéma de vol. Ainsi, avec la position du drone, la position cible, la direction du drone et la direction du vent, il serait possible de calculer le premier sens de virage des schémas de sorte à ce que le drone commence son exploration efficacement.
- La stratégie pour le mode *Recover* n'en est qu'à ses débuts. Il faudrait à l'avenir réfléchir à des approches viables pour retrouver le nuage dans un laps de temps réduit et ainsi prouver que les schémas deviennent totalement autonomes malgré les pertes possibles du suivi du nuage.
- Les améliorations apportées sur la distance minimale pour détecter la première fois le nuage et le temps minimal à passer dans un état avant de valider la détection d'une bordure restent des modifications à prouver en simulation notamment avec des situations pensées pour tester ces fonctionnalités.
- Pour finir, on a pu voir que la méthode de calcul par défaut du barycentre utilisé par le schéma *Rosette* présente encore des faiblesses en simulation dynamique. À l'avenir, il faudrait trouver et implémenter un algorithme permettant d'estimer précisément ce centre géométrique du nuage.

On a également pu remarquer lors de la campagne de vol à la Barbade qu'un certain nombre de paramètres dont se servaient les schémas de vol adaptatifs étaient imprécis et mal estimés. Voici les améliorations pensées pour les paramètres qui influencent les schémas de vol :

- D'un point de vue du capteur de nuage utilisé, on a pu voir que le signal résultant était très dur à exploiter. L'idée serait donc de trouver un capteur de LWC différent pour obtenir un signal moins bruité. On pourrait également travailler plus profondément sur la bonne intégration de ce capteur dans la charge utile (notamment pour éviter les chutes de signal lors des phases de consommation plus importante) et améliorer les fonctions de filtrage.
- En ce qui concerne l'estimation du vent, il est clair que c'est un facteur important qui cause la perte du suivi du nuage. Les situations de perte illustrées dans les simulations dynamiques, ainsi que les observations faites pendant la campagne, montrent bien que si il y a une trop grosse différence entre le vent

réel et le vent paramétré les schémas de vol adaptatifs se perdent. L'estimation du vent est donc un paramètre clé pour le bon déroulement de l'exploration. Il faudrait donc trouver une meilleure méthode d'estimation (en utilisant par exemple un capteur de vent dédié) et éventuellement fournir automatiquement le vent aux schémas de vol sans même passer par l'opérateur.

Finalement, l'architecture développée dans l'ensemble de ce travail est encore très loin de la vision de l'architecture distribuée pensée au début de la thèse. Cependant, même si l'architecture de notre système reste centralisée, une grande part du travail de thèse s'est concentrée sur l'étude des approches et des méthodes distribuées à intégrer à l'architecture globale. Voici une liste des quelques améliorations discutées :

- La partie très importante pour construire cette architecture distribuée est tout d'abord d'ajouter un modem courte portée à chaque drone ainsi que des logiciels permettant la gestion efficace d'un réseaux de type "mesh" ou "ad-hoc".
- Il faudrait également mettre en place un algorithme de contrôle de la flotte pour que l'opérateur n'ait plus à gérer les phases d'attente et de recherche de nuage individuellement pour chaque drone. Cela se caractériserait principalement par l'ajout d'un logiciel permettant de planifier les actions de la flotte en fonction des ordres des opérateurs.
- Le plus gros du travail sur l'architecture est représenté par l'implémentation d'un algorithme de décision distribué afin de répartir les différentes actions pour cartographier le nuage. Typiquement l'opérateur devrait interagir avec la flotte part des ordres du types "explorer le haut du nuage" et ce seraient aux drones de décider entre eux qui doit prendre l'action en fonction du coût de cette tâche. Ces méthodes sont déjà bien développées et il existe de nombreuses contributions sur les algorithmes basés sur des systèmes de marchés et d'enchères. L'algorithme le plus étudié pendant cette thèse était le Contract Net Protocol qui pourrait être un très bon candidat pour la prise de décision collective.
- Le système CAMS a montré de grands avantages dans son utilisation pour cartographier les nuages. Même s'il reste encore du travail à réaliser sur l'algorithme de cartographie, les interfaces proposées sont déjà très fonctionnelles et permettent de mettre en place des missions d'exploration efficacement. Pour l'avenir, ce système a pour but d'évoluer encore et vise à être utilisé pour d'autres applications de cartographie.
- Au début du projet [NEPHELAE](#), il était prévu d'utiliser le système de caméra AllSky [[Lauda 2016](#)] afin de construire une première carte initiale de la position des nuages dans une large zone. L'intégration de ce système dans l'architecture globale n'a pas pu se réaliser et le manque s'est fait sentir pendant la campagne de vol. En effet, au lieu d'avoir une première phase de recherche assez longue et d'attendre qu'un nuage croise la trajectoire de notre drone, ce système aurait permis de lancer directement nos stratégies d'exploration

dans les nuages. L'équipe de **NEPHELAE** a toujours pour but d'intégrer le système AllSky pour les futures expérimentations.

Finalement, l'ensemble des objectifs de la thèse et du projet **NEPHELAE** étaient très larges et l'accomplissement de tous ces objectifs n'était pas réalisable sur la durée de la thèse. Le travail et les contributions apportés sur l'exploration et l'échantillonnage de nuages avec une flotte de drones n'en est qu'à ses débuts.

Conclusion

Contents

7.1	Problématique et synthèses des chapitres	133
7.2	Bilan méthodologique	134
7.3	Résultats et contributions	135

7.1 Problématique et synthèses des chapitres

Pour réaliser un bilan de ce manuscrit il est d'abord important de reprendre les problématiques principales liées à l'exploration de phénomènes atmosphériques et les objectifs qui ont été fixés dans le cadre de la thèse et du projet **NEPHELAE**. Les récents travaux issus des projets Voltige et SkyScanner ont fourni un ensemble de connaissances importantes qui ont permis de poser dès le début du projet des problématiques de recherches intéressantes. La principale est directement liée au caractère dynamique des phénomènes atmosphériques que l'on souhaite observer. Les drones sont capables de réaliser des formes géométriques basées sur des positions GPS mais suivre un phénomène dynamique se déplaçant et évoluant dans le temps est bien plus compliqué. La première problématique porte donc sur les méthodes d'exploration pouvant être utilisées pour permettre à un drone de suivre l'évolution d'un environnement dynamique. Pour atteindre une étape supérieure, le déploiement de plusieurs drones simultanément est indispensable. Pour se faire, la seconde problématique repose sur le choix du type d'architecture (centralisée, distribuée) et des parties qui la composent pour permettre la coordination d'une flotte de drones.

L'objectif principal de la thèse a donc été de mettre en place une architecture logicielle permettant à une flotte d'échantillonner un nuage pendant sa durée de vie. Deux objectifs plus précis se dégagent : développer une stratégie et des méthodes de navigation adaptées à l'exploration de nuages et construire une architecture capable de cartographier les nuages, de planifier la mission et de coordonner la flotte.

Les précédents travaux scientifiques sur des thématiques similaires ont permis dans un premier temps de définir une ligne directrice pour cette thèse. L'état de l'art du chapitre 2 explore les différentes méthodes et approches utilisées dans ces travaux pour l'exploration d'environnements inconnus par des systèmes multi-agents. De plus, ces études montrent l'importance de développer des trajectoires réactives et adaptables. Il est également primordial de passer par une étape de simulations (statiques puis dynamiques) réalistes avant d'affronter les conditions réelles. Enfin,

ces travaux exposent les avantages d'une architecture distribuée pour un système multi-agents. Elle permet notamment de répartir la charge de calcul entre chaque agent et rend ainsi l'ensemble du système évolutif et plus robuste.

Dans le chapitre 3, une architecture distribuée avec de multiples fonctionnalités a donc été pensée en considérant les contraintes (liées aux drones et à la communication) et les spécificités des nuages. Cependant, le temps nous a seulement permis de réellement développer une architecture centralisée présentée à la fin du chapitre.

Dans le chapitre 4, on met l'accent sur l'importance de définir des zones d'intérêts dans le nuage, ainsi que de déterminer l'ordre des tâches des drones. Les schémas basiques étant trop contraignants à gérer pour l'opérateur, nous concluons sur la nécessité de développer des schémas adaptatifs plus autonomes : *Lace*, *Rosette* et *Trinity*. Ces schémas ont été validés par des simulations statiques, dynamiques et hybrides dans le chapitre 5.

D'après les résultats, plusieurs hypothèses peuvent être formulées sur les spécificités de chaque schéma : le *Lace* permet d'effectuer un tour de nuage rapidement, le *Rosette* de collecter beaucoup de données à l'intérieur du nuage et le *Trinity* de collecter des données à la fois à la bordure et à l'intérieur du nuage. Toutefois, ils possèdent tous des inconvénients à prendre en compte selon les besoins. La campagne à la Barbade a fourni des résultats satisfaisants : les schémas ont prouvé leur efficacité quant à leurs capacités de suivre l'évolution du nuage et ont permis de collecter un grand nombre de données atmosphériques.

Il reste assurément des améliorations à effectuer pour augmenter la robustesse de ces schémas comme présenté dans le chapitre 6. Les travaux futurs permettraient à terme le déploiement d'une flotte de drones à l'aide d'une architecture distribuée.

7.2 Bilan méthodologique

Plusieurs obstacles ont été rencontrés lors de cette thèse et nous ont demandés de constantes adaptations dans les solutions retenues. Tout d'abord au niveau du matériel ; les drones existants n'étant pas adéquats en termes de spécificités pour l'exploration d'un nuage, un nouveau drone répondant au cahier des charges à du être entièrement conçu avec des process adaptés. Au niveau de la communication, il a fallu sélectionner un système longue portée adapté.

Deuxièmement, pour échantillonner un phénomène tel qu'un nuage, plusieurs limites sont apparues. En effet le nuage possède un trop grand volume pour pouvoir l'explorer entièrement avec une flotte de drone de petite taille. Il a donc été indispensable de définir des zones d'intérêts où collecter des données intéressantes pour permettre aux scientifiques de l'atmosphère de modéliser le phénomène.

Des difficultés ont également été soulevées lors du développement des trajectoires : comment faire pour explorer une forme (comme un nuage) avec des objectifs différents ? Comment faire évoluer un schéma d'exploration statique vers un environnement dynamique ? La clé a été de définir des stratégies de planification de trajectoires en fonction de chaque objectif ou zone d'intérêts. On a de plus utilisé le

vent estimé par le drone pour l'appliquer aux schémas de vol et ainsi déplacer leurs zones d'exécution avec le mouvement d'advection.

Ensuite, des problèmes ont été rencontrés concernant les logiciels et notamment pour la mise en place des simulations réalistes et dynamiques. C'est en utilisant PPRZ et JSBSIM que la mise en place des simulations de drones respectant les contraintes du vrai monde a été possible, ainsi que CAMS et MesoNH pour des simulations réalistes d'un environnement nuageux statique ou dynamique.

Enfin, les derniers obstacles concernent l'architecture distribuée. Ici, seule une architecture centralisée a été déployée, mais tous les développements ont été faits pour être intégrables au sein d'une architecture distribuée par la suite.

Pour conclure, la majorité des obstacles rencontrés ont été résolus. Seuls restent les problèmes sur l'estimation du vent en vol et sur le bruit du signal du capteur servant à la détection. Pour ce dernier, l'ajout de fonction de filtrage a montré une certaine amélioration mais le signal reste tout de même trop bruité pour être utilisé correctement par les schémas. Toutefois ces obstacles n'impactent en rien les données collectées (corrigées en post-traitement) lors des phases d'exploration réussies et les résultats proposés ne sont donc pas invalidés par ces erreurs.

7.3 Résultats et contributions

La principale contribution de cette thèse est la présentation de nouveaux schémas de vol adaptatifs permettant le suivi d'un nuage et la collecte de données pour mieux modéliser son évolution. Les résultats obtenus en simulation et lors de la campagne à la Barbade prouvent que les schémas de vol adaptatifs sont intéressants pour l'exploration d'environnements dynamiques. La première problématique peut donc être considérée comme traitée. Il reste bien sûr des améliorations à effectuer sur les fonctions de navigation en s'assurant d'une méthode de récupération robuste.

Concernant la deuxième problématique, liée à l'architecture distribuée, elle n'a été traitée que partiellement, puisque même si les bases ont été posées elle n'a pas été réellement développée. Un travail d'implémentation est encore nécessaire sur cette partie notamment en ajoutant un algorithme de décision distribué et un système de communication inter-drones.

Pour finir, cette thèse a démontré la faisabilité d'explorer des environnements dynamiques atmosphériques par des drones en utilisant des stratégies d'exploration adaptatives et en se reposant sur une architecture centralisée. On peut ainsi imaginer que le développement de l'architecture distribuée présentée dans cette thèse permettrait de faciliter le déploiement d'une flotte, rendant ainsi le système plus autonome, plus efficace et plus robuste. On pourrait finalement projeter l'application de ce système dans d'autres cas d'applications tels que l'exploration de fronts de feux de forêt, la cartographie de nappes d'hydrocarbures en mer ou encore l'échantillonnage de panaches de fumées polluantes.

Annexes

Présentation générale de Paparazzi

A.1 Le plan de vol

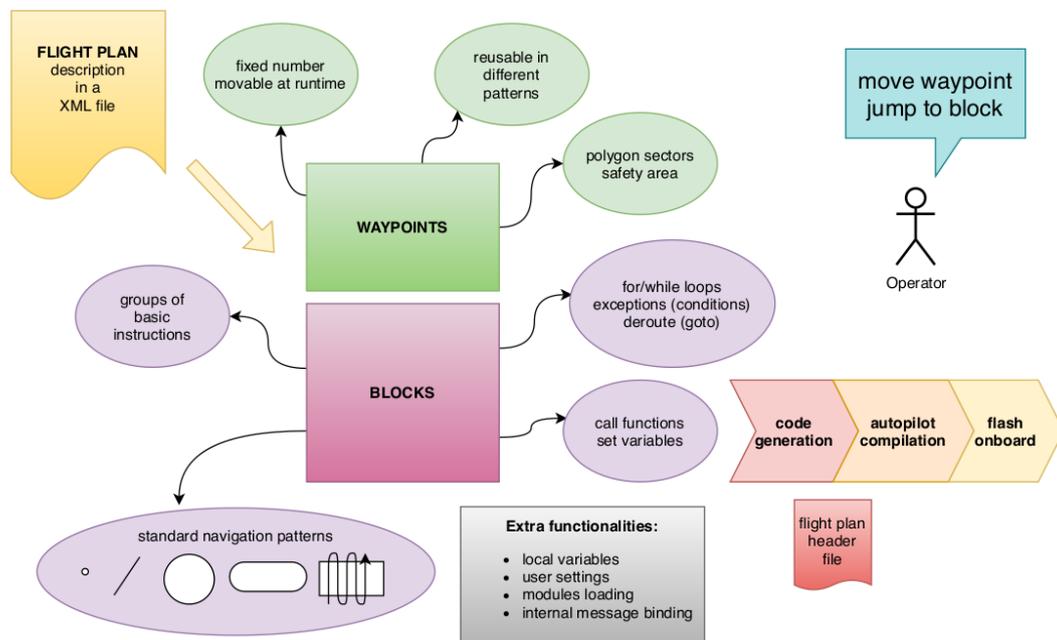


FIGURE A.1 – Schéma détaillant le fonctionnement du plan de vol du système Paparazzi

A.2 Le mode mission

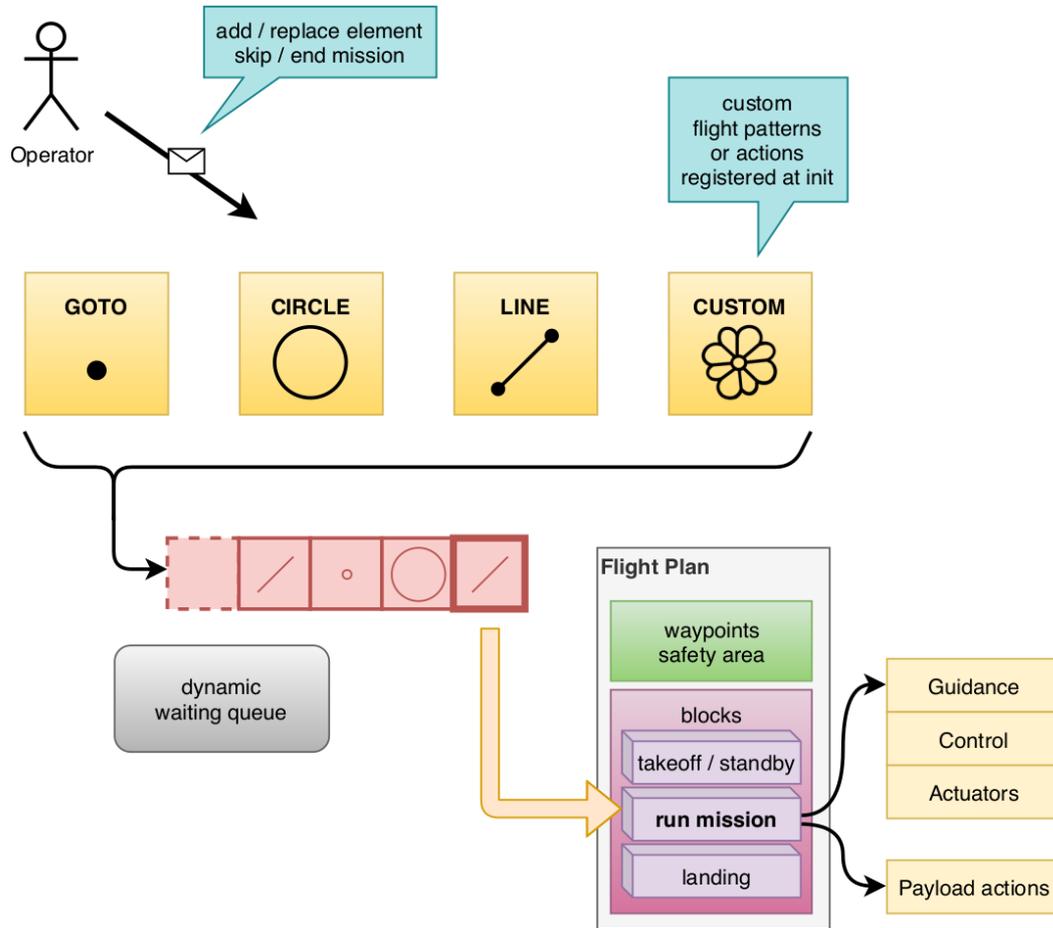


FIGURE A.2 – Schéma détaillant le fonctionnement du mode mission du système Paparazzi

Bibliographie

- [Ahmed 2016] Nisar Ahmed, Jorge Cortes et Sonia Martinez. *Distributed Control and Estimation of Robotic Vehicle Networks : Overview of the Special Issue*. IEEE Control Systems, vol. 36, no. 2, pages 36–40, 2016. ISBN : 1066-033X VO - 36. (Cité en page 32.)
- [Bailon-Ruiz 2017] Rafael Bailon-Ruiz, Christophe Reymann, Simon Lacroix, Gauthier Hattenberger, Hector Garcia de Marina et Faycal Lamraoui. *System simulation of a fleet of drones to probe cumulus clouds*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pages 375–382, 2017. ISBN : 978-1-5090-4495-5. (Cité en pages 13 et 128.)
- [Bailon-Ruiz 2018] Rafael Bailon-Ruiz, Simon Lacroix et Arthur Bit-Monnot. *Planning to Monitor Wildfires with a Fleet of UAVs*. In 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 4729–4734, Octobre 2018. ISSN : 2153-0866. (Cité en page 3.)
- [Baran 1964] P. Baran. *On Distributed Communications Networks*. IEEE Transactions on Communications, vol. 12, no. 1, pages 1–9, 1964. ISBN : 0096-1965 VO - 12. (Cité en pages 27 et 28.)
- [Barbier 2004] Magali Barbier et Elodie Chantry. *Autonomous mission management for unmanned aerial vehicles*. Aerospace Science and Technology, vol. 8, no. 4, pages 359–368, 2004. (Cité en page 21.)
- [Barritt 2017] Brian Barritt, Tatiana Kichkaylo, Ketan Mandke, Adam Zalzman et Victor Lin. *Operating a UAV mesh & internet backhaul network using temporospatial SDN*. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2017. ISBN : 9781509016136. (Cité en page 29.)
- [Bass 2003] Len Bass, Paul Clements et Rick Kazman. *Software Architecture in Practice*. Addison-Wesley Professional, 2003. Google-Books-ID : mdiIu8Kk1WMC. (Cité en page 24.)
- [Berkes 2003] Jem E Berkes. *Decentralized Peer-to-Peer Network Architecture : Gnutella and Freenet*. 2003. (Cité en page 29.)
- [Billard 1999] Aude Billard, Auke Jan Ijspeert et Alcherio Martinoli. *A Multi-robot System for Adaptive Exploration of a Fast-changing Environment : Probabilistic Modeling and Experimental Study*. Connection Science, vol. 11, no. 3-4, pages 359–379, D?embre 1999. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/095400999116304>. (Cité en page 17.)
- [Bit-Monnot 2018] Arthur Bit-Monnot, Rafael Bailon-Ruiz et Simon Lacroix. *A Local Search Approach to Observation Planning with Multiple UAVs*. In International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS), page 9p., Delft, Netherlands, Juin 2018. (Cité en page 3.)

- [Bonnin 2015] V. Bonnin, E. Benard et J.-M. Moschetta. *Energy-Harvesting Mechanisms for UAV Flight by Dynamic Soaring*. International Journal of Micro Air Vehicles, vol. 7, no. 3, pages 213–230, 2015. (Cité en pages 22 et 74.)
- [Bony 2017] Sandrine Bony, Bjorn Stevens, Felix Ament, Sebastien Bigorre, Patrick Chazette, Susanne Crewell, Julien Delano , Kerry Emanuel, David Farrell, Cyrille Flamant, Silke Gross, Lutz Hirsch, Johannes Karstensen, Bernhard Mayer, Louise Nuijens, James H. Ruppert, Irina Sandu, Pier Siebesma, Sabrina Speich, Frédéric Szczap, Julien Totems, Raphaela Vogel, Manfred Wendisch et Martin Wirth. *EUREC4A : A Field Campaign to Elucidate the Couplings Between Clouds, Convection and Circulation*. Surveys in Geophysics, vol. 38, no. 6, pages 1529–1568, Novembre 2017. (Cité en page 103.)
- [Botelho 1999] S.C. Botelho et R. Alami. *M+ : a scheme for multi-robot cooperation through negotiated task allocation and achievement*. In Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C), volume 2, pages 1234–1239, Detroit, MI, USA, 1999. IEEE. (Cité en page 31.)
- [Bouachir 2014] Ouns Bouachir, Alinoe Abrassart, Fabien Garcia et Nicolas Larrieu. *A mobility model for UAV ad hoc network*. 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), no. May, pages 383–388, 2014. ISBN : 978-1-4799-2376-2. (Cité en page 29.)
- [Bouhoubeiny 2016] E. Bouhoubeiny, E. Bénard, M. Bronz, N. Gavrilovic et V. Bonnin. *Optimal design of long endurance mini UAVs for atmospheric measurement*. Applied Aerodynamics Conference, 2016. (Cité en page 23.)
- [Brambilla 2013] Manuele Brambilla, Eliseo Ferrante, Mauro Birattari et Marco Dorigo. *Swarm robotics : a review from the swarm engineering perspective*. Swarm Intelligence, vol. 7, no. 1, pages 1–41, Mars 2013. (Cité en page 26.)
- [Brink 2015] Juliane Brink. *Boundary tracking and estimation of pollutant plumes with a mobile sensor in a low-density static sensor network*. Urban Climate, vol. 14, pages 383–395, D embre 2015. (Cité en page 17.)
- [Bronz 2014] Murat Bronz, Gautier Hattenberger, Greg Roberts et Grégoire Cayez. *Development of a High-Performance Compact RPA dedicated to Atmospheric Research*. Mai 2014. (Cité en page 12.)
- [Bronz 2015] Murat Bronz et Gautier Hattenberger. *Design of A High-Performance Tailless MAV Through Planform Optimization*. In 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Juin 2015. _eprint : <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2015-2879>. (Cité en page 12.)
- [Brust 2015] Matthias R. Brust et Bogdan M. Strimbu. *A networked swarm model for UAV deployment in the assessment of forest environments*. IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, ISSNIP, no. April, pages 7–9, 2015. ISBN : 9781479980550 _eprint : 1607.04439. (Cité en page 22.)

- [Bryson 2007] Mitch Bryson et Salah Sukkarieh. *Co-operative Localisation and Mapping for Multiple UAVs in Unknown Environments*. IEEE Aerospace Conference, pages 1–12, 2007. ISBN : 1-4244-0524-6. (Cité en pages 19 et 30.)
- [Båserud 2016] Line Båserud, Joachim Reuder, Marius O. Jonassen, Stephan T. Kral, Mostafa B. Paskyabi et Marie Lothon. *Proof of concept for turbulence measurements with the RPAS SUMO during the BLLAST campaign*. Atmospheric Measurement Techniques, vol. 9, no. 10, pages 4901–4913, Octobre 2016. Publisher : Copernicus GmbH. (Cité en page 12.)
- [Buisson 2002] Marcellin Buisson, Alexandre Bustico, Stéphane Chatty, François-Régis Collin, Yannick Jestin, Sébastien Maury, Christophe Mertz et Philippe Truillet. *Ivy / Proceedings of the 14th Conference on l'Interaction Homme-Machine*, 2002. (Cité en page 46.)
- [Burgard 2005] W. Burgard, M. Moors, C. Stachniss et F.E. Schneider. *Coordinated multi-robot exploration*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, no. 3, pages 376–386, Juin 2005. Conference Name : IEEE Transactions on Robotics. (Cité en page 18.)
- [Burnet 2007] Frédéric Burnet et Jean-Louis Brenguier. *Observational Study of the Entrainment-Mixing Process in Warm Convective Clouds*. Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 64, no. 6, pages 1995–2011, Juin 2007. Publisher : American Meteorological Society. (Cité en page 10.)
- [Cabarbaye 2018] Aurélien Cabarbaye, Titouan Verdu, Miguel Jacson et Gautier Hattenberger. *Accurate control law for low-cost UAV*. pages p. 150–159, Novembre 2018. (Cité en pages 6 et 40.)
- [Cabarbaye 2019] Aurélien Cabarbaye, Titouan Verdu, Fabien Garcia, Michel Gorraz, Alexandre Bustico, Murat Bronz et Gautier Hattenberger. *Design of a high performance MAV for atmospheric research*. Septembre 2019. (Cité en pages 6 et 40.)
- [Calderón-Arce 2018] C. Calderón-Arce, R. Solís-Ortega et T. Bustillos-Lewis. *Path Planning on Static Environments based on Exploration with a Swarm Robotics and RRG Algorithms*. In 2018 IEEE 38th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII), pages 1–6, Novembre 2018. (Cité en page 17.)
- [Calovi 2014] Daniel S. Calovi, Ugo Lopez, Sandrine Ngo, Clément Sire, Hugues Chaté et Guy Theraulaz. *Swarming, schooling, milling : phase diagram of a data-driven fish school model*. New Journal of Physics, vol. 16, no. 1, page 015026, Janvier 2014. Publisher : IOP Publishing. (Cité en page 26.)
- [Capitan 2014] Jesus Capitan, Matthijs Spaan, Luis Merino et Anibal Ollero. *Decentralized Multi-Robot Cooperation with Auctioned POMDPs*. page 4, 2014. (Cité en page 32.)
- [Chakrabarty 2010] Anjan Chakrabarty et Jack W Langelaan. *Flight Path Planning for UAV Atmospheric Energy Harvesting Using Heuristic Search*. AIAA

- Guidance, Navigation and Control Conference, no. August, pages 1–18, 2010. ISBN : 9781600869624. (Cité en pages 22 et 74.)
- [Chanel 2013] Caroline P. Carvalho Chanel, Florent Teichteil-Königsbuch et Charles Lesire. *Multi-target detection and recognition by UAVs using online POMDPs*. Proceedings of the Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence, pages 1381–1387, 2013. ISBN : 9781577356158. (Cité en page 21.)
- [Chanel 2014] C.P.C.a Chanel, C.b Lesire et F.b Töchteil-Konigsbuch. *A robotic execution framework for online probabilistic (re)planning*. Proceedings International Conference on Automated Planning and Scheduling, ICAPS, vol. 2014-Janua, no. January, pages 454–462, 2014. (Cité en page 21.)
- [Chanthery 2005] Elodie Chanthery. *Planification de mission pour un véhicule aérien autonome*. pages 1–2, 2005. (Cité en page 21.)
- [Ciubotaru 2013] B. Ciubotaru et G-M. Muntean. *Network Architectures*. In Advanced Network Programming – Principles and Techniques, Computer Communications and Networks. 2013. (Cité en page 28.)
- [Cobano 2013] J. A. Cobano, D. Alejo, S. Vera, G. Heredia et A. Ollero. *Multiple gliding UAV coordination for static soaring in real time applications*. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 790–795, 2013. ISBN : 9781467356411. (Cité en pages 22 et 74.)
- [Corrigan 2008] C. E. Corrigan, G. C. Roberts, M. V. Ramana, D. Kim et V. Ramanathan. *Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the Indian Ocean using autonomous unmanned aerial vehicles*. Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 8, no. 3, pages 737–747, F ?rier 2008. Publisher : European Geosciences Union. (Cité en page 10.)
- [Cuxart 2016] Joan Cuxart, Burkhard Wrenger, Daniel Martínez-Villagrasa, Joachim Reuder, Marius O. Jonassen, Maria A. Jiménez, Marie Lothon, Fabienne Lohou, Oscar Hartogensis, Jens Dünnermann, Laura Conangla et Anirban Garai. *Estimation of the advection effects induced by surface heterogeneities in the surface energy budget*. Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 16, no. 14, pages 9489–9504, Juillet 2016. Publisher : Copernicus GmbH. (Cité en page 12.)
- [Davidson 2014] Neil Davidson et Claire Howell Major. *Boundary Crossings : Cooperative Learning, Collaborative Learning, and Problem-Based Learning*. Journal on Excellence in College Teaching, vol. 25, no. 3&4, pages 7–55, 2014. ISBN : 1052-4800. (Cité en page 18.)
- [De Marina 2017] Hector Garcia De Marina, Yuri A. Kapitanjuk, Murat Bronz, Gautier Hattenberger et Ming Cao. *Guidance algorithm for smooth trajectory tracking of a fixed wing UAV flying in wind flows*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 5740–5745, 2017. ISBN : 9781509046331 _eprint : 1610.02797. (Cité en page 20.)

- [Dias 2006] M.B. Dias, R. Zlot, N. Kalra et A. Stentz. *Market-Based Multirobot Coordination : A Survey and Analysis*. Proceedings of the IEEE, vol. 94, no. 7, pages 1257–1270, Juillet 2006. (Cité en page 32.)
- [Doherty 2004] P. Doherty, P. Haslum, F. Heintz, T. Merz, P. Nyblom, T. Persson et B. Wingman. *A distributed architecture for autonomous unmanned aerial vehicle experimentation*. In In Proceedings of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, pages 221–230, 2004. (Cité en page 26.)
- [Egorova 2016] T Egorova, N A Gatsonis et M A Demetriou. *Estimation of Gaseous Plume Concentration with an Unmanned Aerial Vehicle*. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 39, no. 6, pages 1314–1324, 2016. ISBN : 978-1-62410-389-6. (Cité en page 11.)
- [Elston 2011] Jack S. Elston, Jason Roadman, Maciej Stachura, Brian Argrow, Adam Houston et Eric Frew. *The tempest unmanned aircraft system for in situ observations of tornadic supercells : Design and VORTEX2 flight results*. Journal of Field Robotics, vol. 28, no. 4, pages 461–483, 2011. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/rob.20394>. (Cité en page 10.)
- [Fielding 2000] Roy Thomas Fielding. *in Information and Computer Science*. page 180, 2000. (Cité en page 24.)
- [Gao 2016] Fei Gao et Shaojie Shen. *Online Quadrotor Trajectory Generation and Autonomous Navigation on Point Cloud*. IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), pages 139–146, 2016. ISBN : 9781509043491. (Cité en page 16.)
- [Gao 2017] Fei Gao et Shaojie Shen. *Quadrotor Trajectory Generation in Dynamic Environments Using Semi-Definite Relaxation on Nonconvex QCQP*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 6354–6361, 2017. ISBN : 9781509046324. (Cité en pages 17 et 19.)
- [Gerkey 2002] B.P. Gerkey et M.J. Mataric. *Sold! : auction methods for multirobot coordination*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 18, no. 5, pages 758–768, Octobre 2002. (Cité en page 31.)
- [Ghidoni 2014] Stefano Ghidoni, Salvatore M. Anzalone, Matteo Munaro, Stefano Michieletto et Emanuele Menegatti. *A distributed perception infrastructure for robot assisted living*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 62, no. 9, pages 1316–1328, 2014. Publisher : Elsevier B.V. (Cité en pages 25 et 30.)
- [Goerzen 2010] C. Goerzen, Z. Kong et B. Mettler. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance, volume 57. 2010. ISSN : 09210296 Publication Title : Journal of Intelligent and Robotic Systems : Theory and Applications. (Cité en page 20.)
- [Harrison 2014] R. G. Harrison et K. A. Nicoll. *Note : Active optical detection of cloud from a balloon platform*. Review of Scientific Instruments, vol. 85, no. 6,

- page 066104, 2014. _eprint : <https://doi.org/10.1063/1.4882318>. (Cité en page 106.)
- [Hattenberger 2006] Gautier Hattenberger, Rachid Alami et Simon Lacroix. *Planning and control for Unmanned Air Vehicle formation flight*. In 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 5931–5936, Octobre 2006. ISSN : 2153-0866. (Cité en page 21.)
- [Hattenberger 2013] Gautier Hattenberger, Grégoire Cayez et Greg Roberts. *Flight tests for meteorological studies with MAV*. page pp xxxx, Septembre 2013. (Cité en page 12.)
- [Hattenberger 2014] Gautier Hattenberger, Murat Bronz et Michel Gorraz. *Using the Paparazzi UAV System for Scientific Research*. In IMAV 2014, International Micro Air Vehicle Conference and Competition 2014, pages pp 247–252, Delft, Netherlands, Ao?t 2014. (Cité en page 12.)
- [Henri 1998] France Henri et Karin Lundgren-Cayrol. *Apprentissage collaboratif et nouvelles technologies*. Bureau des technologies d’apprentissage, page 175, 1998. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Kapoutsis 2013] A. Ch. Kapoutsis, S. A. Chatzichristofis, L. Doitsidis, J. Borges de Sousa et E. B. Kosmatopoulos. *Autonomous navigation of teams of Unmanned Aerial or Underwater Vehicles for exploration of unknown static dynamic environments*. In 21st Mediterranean Conference on Control and Automation, pages 1181–1188, Juin 2013. (Cité en page 20.)
- [Kim 2006] Jong Hyuk Kim, Salah Sukkarieh et Stuart Wishart. *Real-time navigation, guidance, and control of a UAV using low-cost sensors*. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 24, pages 299–309, 2006. ISBN : 3540328017. (Cité en page 20.)
- [Kral 2018] Stephan T. Kral, Joachim Reuder, Timo Vihma, Irene Suomi, Ewan O’Connor, Rostislav Kouznetsov, Burkhard Wrenger, Alexander Rautenberg, Gabin Urbancic, Marius O. Jonassen, Line B aserud, Bj rn Maronga, Stephanie Mayer, Torge Lorenz, Albert A. M. Holtslag, Gert-Jan Steeneveld, Andrew Seidl, Martin M ller, Christian Lindenberg, Carsten Langohr, Hendrik Voss, Jens Bange, Marie Hundhausen, Philipp Hilsheimer et Markus Schygulla. *Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR)—The Hailuoto 2017 Campaign*. Atmosphere, vol. 9, no. 7, page 268, Juillet 2018. Number : 7 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité en page 12.)
- [Lac 2018] Christine Lac, Jean-Pierre Chaboureau, Valéry Masson, Jean-Pierre Pinty, Pierre Tulet, Juan Escobar, Maud Leriche, Christelle Barthe, Benjamin Aouizerats, Clotilde Augros, Pierre Aumond, Franck Auguste, Peter Bechtold, Sarah Berthet, Soline Bielli, Frédéric Bosseur, Olivier Caumont, Jean-Martial Cohard, Jeanne Colin, Fleur Couvreur, Joan Cuxart, Gaëlle Delautier, Thibaut Dauhut, Véronique Ducrocq, Jean-Baptiste Filippi, Didier Gazen, Olivier Geoffroy, François Gheusi, Rachel Honnert, Jean-Philippe

- Lafore, Cindy Lebeau-pin Brossier, Quentin Libois, Thibaut Lunet, Céline Mari, Tomislav Maric, Patrick Mascart, Maxime Mogé, Gilles Molinié, Olivier Nuissier, Florian Pantillon, Philippe Peyrillé, Julien Pergaud, Emilie Perraud, Joris Pianezze, Jean-Luc Redelsperger, Didier Ricard, Evelyne Richard, Sébastien Riette, Quentin Rodier, Robert Schoetter, Léo Seyfried, Joël Stein, Karsten Suhre, Marie Taufour, Odile Thouron, Sandra Turner, Antoine Verrelle, Benoît Vié, Florian Visentin, Vincent Vionnet et Philippe Wautelet. *Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications*. Geoscientific Model Development, vol. 11, no. 5, pages 1929–1969, Mai 2018. (Cité en page 42.)
- [Lacroix 2007] Simon Lacroix, Rachid Alami, Thomas Lemaire, Gautier Hattenberger et Jérémie Gancet. *Decision Making in Multi-UAVs Systems : Architecture and Algorithms*. In Aníbal Ollero et Iván Maza, editeurs, Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles, Springer Tracts in Advanced Robotics, pages 15–48. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. (Cité en page 32.)
- [Lamraoui 2014] Fayçal Lamraoui. *In-cloud icing and supercooled cloud microphysics : from reanalysis to mesoscale modeling*. PhD Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, 2014. (Cité en pages 10 et 41.)
- [Lamraoui 2016] Fayçal Lamraoui, Gregory C. Roberts, Frédéric Burnet et Simon Lacroix. *3D in-situ measurements of entrainment-related cumulus clouds properties using a swarm of unmanned aerial vehicles - Archive ouverte HAL*, 2016. (Cité en page 41.)
- [Langelaan 2007] Jack W. Langelaan. *Long Distance / Duration Trajectory Optimization for Small UAVs*. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, no. August, pages 1–14, 2007. ISBN : 978-1-62410-015-4. (Cité en pages 22 et 74.)
- [Lann 1977] Gérard Le Lann. *Distributed Systems – Towards a Formal Approach*. 1977. Publication Title : IFIP Congress. (Cité en page 24.)
- [Lauda 2016] Samuel Lauda. *All-Sky Camera Network to Track Clouds and Calculate their Spatial Dimensions*. Master’s thesis, ENM - INP Toulouse, 2016. (Cité en pages 13 et 130.)
- [LaValle 2006] Steven M. LaValle. *Planning Algorithms*. Planning Algorithms, pages 1–826, 2006. ISBN : 9780511546877 _eprint : arXiv :1011.1669v3. (Cité en page 21.)
- [Lemaire 2004] T. Lemaire, R. Alami et S. Lacroix. *A distributed tasks allocation scheme in multi-UAV context*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004, pages 3622–3627 Vol.4, 2004. ISBN : 0-7803-8232-3. (Cité en pages 19 et 32.)
- [Li 2016] L. Li, G. Heymsfield, J. Carswell, D. H. Schaubert, M. L. McLinden, J. Creticos, M. Perrine, M. Coon, J. I. Cervantes, M. Vega, S. Guimond, L. Tian et A. Emory. *The NASA High-Altitude Imaging Wind and Rain*

- Airborne Profiler*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 54, no. 1, pages 298–310, Janvier 2016. (Cité en page 10.)
- [Martinez 2007] Sonia Martinez, Jorge Cortes et Francesco Bullo. *Motion Coordination with Distributed Information*. IEEE Control Systems Magazine, vol. 27, no. 4, pages 75–88, Août 2007. Conference Name : IEEE Control Systems Magazine. (Cité en page 26.)
- [Maxa 2017a] Jean-Aimé Maxa. *Architecture de communication sécurisée d'une flotte de drones*. 2017. (Cité en page 29.)
- [Maxa 2017b] Jean Aimé Maxa, Mohamed Slim Ben Mahmoud et Nicolas Larrieu. *Survey on UAANET routing protocols and network security challenges*. Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks, vol. 37, no. 1-4, pages 231–320, 2017. ISBN : 0929-7049 _eprint : arXiv :1208.5721. (Cité en page 29.)
- [Mayer 2012] Stéphanie Mayer, Gautier Hattenberger, Pascal Brisset, Marius Jonassen et Joachim Reuder. *A "no-flow-sensor" wind estimation algorithm for unmanned aerial systems*. International Journal of Micro Air Vehicles, vol. 4, no. 1, pages pp 15–30, Mars 2012. Publisher : SAGE. (Cité en page 112.)
- [Mechoso 2014] C. R. Mechoso, R. Wood, R. Weller, C. S. Bretherton, A. D. Clarke, H. Coe, C. Fairall, J. T. Farrar, G. Feingold, R. Garreaud, C. Grados, J. McWilliams, S. P. de Szoeke, S. E. Yuter et P. Zuidema. *Ocean–Cloud–Atmosphere–Land Interactions in the Southeastern Pacific : The VOCALS Program*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 95, no. 3, pages 357–375, Mars 2014. Publisher : American Meteorological Society. (Cité en page 10.)
- [Meier 2006] D. Meier, C. Stachniss et W. Burgard. *Cooperative Exploration With Multiple Robots Using Low Bandwidth Communication*. In J. Beyerer, F. Puente León et K.-D. Sommer, éditeurs, Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik, page 7, 2006. (Cité en page 22.)
- [Naud 2018] Catherine M. Naud, James F. Booth et Fayçal Lamraoui. *Post Cold Frontal Clouds at the ARM Eastern North Atlantic Site : An Examination of the Relationship Between Large-Scale Environment and Low-Level Cloud Properties*. Journal of Geophysical Research : Atmospheres, vol. 123, no. 21, pages 12,117–12,132, 2018. _eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018JD029015>. (Cité en page 41.)
- [NET 2005] NET. *Network Topologies*. Rapport technique, 2005. (Cité en page 29.)
- [Nguyen 2016] Joseph L. Nguyen, Nicholas R.J. Lawrance, Robert Fitch et Salah Sukkarieh. *Real-time path planning for long-term information gathering with an aerial glider*. In Autonomous Robots, volume 40, pages 1017–1039. 2016. ISSN : 15737527. (Cité en page 23.)
- [Olszanecki Barth 2020] Jackson Miguel Olszanecki Barth, Jean-Philippe Condomines, Murat Bronz, Jean-Marc Moschetta, Cédric Join et Michel Fliess.

- Model-free control algorithms for micro air vehicles with transitioning flight capabilities*. International Journal of Micro Air Vehicles, vol. 12, pages 1–22, Avril 2020. Publisher : SAGE. (Cité en page 38.)
- [Othmani-guibourg 2017] Mehdi Othmani-guibourg, Amal El Fallah-seghrouchni, Jean-loup Farges et Maria Potop-butucaru. *Multi-agent Patrolling in Dynamic Environments*. IEEE International Conference on Agents (ICA), pages 72–77, 2017. ISBN : 9781538607688. (Cité en pages 18 et 32.)
- [Plate 2012] Erich J. Plate, E. E. Fedorovich, Domingos X. Viegas et J. C. Wynn-gaard. *Buoyant Convection in Geophysical Flows*. Springer Science & Business Media, D embre 2012. Google-Books-ID : 2J_qCAAQBAJ. (Cité en page 10.)
- [Rauber 2007] Robert M. Rauber, Bjorn Stevens, Harry T. Ochs, Charles Knight, B. A. Albrecht, A. M. Blyth, C. W. Fairall, J. B. Jensen, S. G. Lasher-Trapp, O. L. Mayol-Bracero, G. Vali, J. R. Anderson, B. A. Baker, A. R. Bandy, E. Burnet, J.-L. Brenguier, W. A. Brewer, P. R. A. Brown, R. Chuang, W. R. Cotton, L. Di Girolamo, B. Geerts, H. Gerber, S. G ke, L. Gomes, B. G. Heikes, J. G. Hudson, P. Kollias, R. R. Lawson, S. K. Krueger, D. H. Lenschow, L. Nuijens, D. W. O’Sullivan, R. A. Rilling, D. C. Rogers, A. P. Siebesma, E. Snodgrass, J. L. Stith, D. C. Thornton, S. Tucker, C. H. Twohy et P. Zuidema. *Rain in Shallow Cumulus Over the Ocean : The RICO Campaign*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 88, no. 12, pages 1912–1928, 2007. _eprint : <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-12-1912>. (Cité en page 10.)
- [Reineman 2016] Benjamin D. Reineman, Luc Lenain et W. Kendall Melville. *The Use of Ship-Launched Fixed-Wing UAVs for Measuring the Marine Atmospheric Boundary Layer and Ocean Surface Processes*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 33, no. 9, pages 2029–2052, 2016. (Cité en page 11.)
- [Renzaglia 2015] Alessandro Renzaglia, Christophe Reymann et Simon Lacroix. *Monitoring Atmospheric Phenomena within Low-Altitude Clouds with a Fleet of Fixed-Wing UAVs*. pages 4–5, 2015. (Cité en page 22.)
- [Renzaglia 2016] Alessandro Renzaglia, Christophe Reymann et Simon Lacroix. *Monitoring the evolution of clouds with UAVs*. In 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 278–283. IEEE, Mai 2016. event-place : Stockholm, Sweden. (Cité en page 13.)
- [Reymann 2018] Christophe Reymann, Alessandro Renzaglia, Fayçal Lamraoui, Murat Bronz et Simon Lacroix. *Adaptive sampling of cumulus clouds with UAVs*. Autonomous Robots, vol. 42, no. 2, pages 491–512, F rier 2018. (Cité en pages 13, 42 et 128.)
- [Riccio 2015] Francesco Riccio, Maria T L zaro, Guglielmo Gemignani et Daniele Nardi. *Multi-Robot Perception and Action : World Modeling and Task Allocation*. 2015. (Cité en pages 25 et 27.)

- [Rodriguez 2016] L. Rodriguez, J. A. Cobano et Aníbal Ollero. *Wind characterization and mapping using fixed-wing small unmanned aerial systems*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), vol. 0, pages 178–184, 2016. ISBN : 9781467393331. (Cité en page 11.)
- [Rogers 2013] Kevin J. Rogers et Anthony Finn. *Frequency estimation for 3D atmospheric tomography using unmanned aerial vehicles*. In 2013 IEEE Eighth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, pages 390–395, Avril 2013. (Cité en page 11.)
- [Rooy 2013] Wim C. de Rooy, Peter Bechtold, Kristina Fröhlich, Cathy Hohenegger, Harm Jonker, Dmitrii Mironov, A. Pier Siebesma, Joao Teixeira et Jun-Ichi Yano. *Entrainment and detrainment in cumulus convection : an overview*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 139, no. 670, pages 1–19, 2013. _eprint : <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.1959>. (Cité en page 10.)
- [Saldana 2017] David Saldana, Renato Assuncao, M. Ani Hsieh, Mario F. M. Campos et Vijay Kumar. *Cooperative prediction of time-varying boundaries with a team of robots*. In 2017 International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (MRS), pages 9–16. IEEE, D embre 2017. event-place : Los Angeles, CA. (Cité en pages 30, 62 et 125.)
- [Sanchez 2017] K. J. Sanchez, G. C. Roberts, R. Calmer, K. Nicoll, E. Hashimshoni, D. Rosenfeld, J. Ovadnevaite, J. Preissler, D. Ceburnis, C. O’Dowd et L. M. Russell. *Top-down and bottom-up aerosol–cloud closure : towards understanding sources of uncertainty in deriving cloud shortwave radiative flux*. Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 17, no. 16, pages 9797–9814, 2017. (Cité en page 11.)
- [Santra 2013] Santanu Santra et Pinaki Pratim Acharjya. *A Study And Analysis on Computer Network Topology For Data Communication*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 3, no. 1, pages 522–525, 2013. (Cité en page 28.)
- [Sharma 2016] Sujata Sharma et Ritu Tiwari. *A survey on multi robots area exploration techniques and algorithms*. In 2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT), pages 151–158, Mars 2016. (Cité en page 17.)
- [Siebesma 1998] A. P. Siebesma, E. J. Plate, E. E. Fedorovich, D. X. Viegas et J. C. Wyngaard. *Shallow Cumulus Convection*. In Buoyant Convection in Geophysical Flows, pages 441–486. Springer Netherlands, Dordrecht, 1998. (Cité en page 10.)
- [Silva 2015] William Silva, Eric W. Frew et Wenceslao Shaw-Cortez. *Implementing path planning and guidance layers for dynamic soaring and persistence missions*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS, pages 92–101, 2015. ISBN : 9781479960101. (Cité en pages 11 et 23.)

- [Sinha 2009] Arpita Sinha, Antonios Tsourdos et Brian White. *Multi UAV negotiation for coordinated tracking of contaminant cloud*. In 2009 European Control Conference (ECC), pages 109–114, Août 2009. (Cité en pages 62 et 125.)
- [Smeur 2019] E. J. J. Smeur, Murat Bronz et G. C. H. E. de Croon. *Incremental control and guidance of hybrid aircraft applied to the Cyclone tailsitter UAV*. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Septembre 2019. Publisher : American Institute of Aeronautics and Astronautics. (Cité en page 38.)
- [Smith 1980] Reid G Smith. *The Contract Net Protocol : High-Level Communication and Control in a Distributed*. IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS, no. 12, page 10, 1980. (Cité en page 31.)
- [Sumpter 2010] David J. T. Sumpter. Collective Animal Behavior. Princeton University Press, Septembre 2010. Google-Books-ID : JwdOrSMmdkUC. (Cité en page 26.)
- [Tsao 1984] David C. Tsao. *What Is a Local Area Network ?* IEEE Communication Magazine, no. 8, pages 7–11, 1984. (Cité en page 28.)
- [Verdu 2019] T. Verdu, G. Hattenberger et S. Lacroix. *Flight patterns for clouds exploration with a fleet of UAVs*. In 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pages 231–237, Juin 2019. ISSN : 2373-6720. (Cité en page 6.)
- [Verdu 2020] Titouan Verdu, Nicolas Maury, Pierre Narvor, Florian Seguin, Gregory Roberts, Fleur Couvreur, Grégoire Cayez, Murat Bronz, Gautier Hattenberger et Simon Lacroix. *Experimental flights of adaptive patterns for cloud exploration with UAVs*. In International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas (USA), Oct. 2020. (Cité en page 7.)
- [Verdu 2021] Titouan Verdu, Gautier Hattenberger et Simon Lacroix. *Experimental flights of adaptive patterns for cloud exploration with UAVs*. In 17th International Symposium on Experimental Robotics, Valetta (Malta), March 2021. (Cité en page 7.)
- [Vey 2014] Quentin Vey, Alain Pirovano, José Radzik et Fabien Garcia. *Aeronautical Ad Hoc Network for Civil Aviation*. pages 81–93, 2014. ISBN : 9783319066448. (Cité en page 29.)
- [Wallace 2006] J.M. Wallace et P.V. Hobbs. Atmospheric Science : An Introductory Survey : Second Edition. Academic Press, 2006. (Cité en page 10.)
- [Wallar 2015] Alex Wallar, Erion Plaku et Donald A. Sofge. *Reactive Motion Planning for Unmanned Aerial Surveillance of Risk-Sensitive Areas*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 12, no. 3, pages 969–980, 2015. (Cité en pages 17 et 19.)
- [Weckesser 1996] P. Weckesser, G. Appenzeller, A. von Essen et R. Dillmann. *Exploration of the environment with an active and intelligent optical sensor system*. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '96, volume 2, pages 664–671 vol.2, Novembre 1996. (Cité en page 17.)

-
- [Weitzenfeld 2003] Alfredo Weitzenfeld et Nalini Venkatasubramanian. *MIRO : An Embedded Distributed Architecture for Biologically inspired Mobile Robots*. page 6, 2003. (Cité en page 26.)
- [Yanmaz 2014] Evşen Yanmaz, Samira Hayat, Jürgen Scherer et Christian Bettstetter. *Experimental performance analysis of two-hop aerial 802.11 networks*. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, vol. 3, pages 3118–3123, 2014. ISBN : 9781479930838. (Cité en page 29.)
- [Zhou 2017] Xin Zhou, Weiping Wang, Tao Wang, Xiaobo Li et Zhifei Li. *A research framework on mission planning of the UAV swarm*. System of Systems Engineering Conference, SoSE, 2017. ISBN : 9781509059454. (Cité en page 21.)
- [Zufferey 2013] Jean-Christophe Zufferey, Sabine Hauert, Timothy Stirling, Severin Leven, James Roberts et Dario Floreano. *Aerial collective systems*. Handbook of Collective Robotics, pages 609–660, 2013. Place : Singapore Publisher : Pan Stanford. (Cité en page 19.)

Schémas de vol adaptatifs pour l'exploration de nuages par une flotte de drones : principe, mise en œuvre et expérimentations

Résumé : Les scientifiques de l'atmosphère cherchent constamment à acquérir de nouvelles données pouvant améliorer leurs modèles des phénomènes atmosphériques, et notamment des nuages. Les méthodes actuelles sont insuffisantes pour collecter des mesures adéquates de la dynamique des nuages et des paramètres microphysiques liés à leur formation générant de grandes incertitudes dans la formulation des modèles. Ce manque de données in-situ pousse les météorologues à trouver de nouvelles méthodes de collecte.

L'utilisation des drones est maintenant largement répandue et de nombreuses applications voient le jour dans différents contextes. Bien que l'utilisation d'un drone unique soit très populaire, le déploiement de flottes de drones est encore peu courant et se limite principalement à de l'exploration et de la cartographie d'environnements inconnus statiques. Une flotte pourrait trouver son utilité dans d'autres applications plus complexes comme le suivi de phénomènes dynamiques (e.g flaques d'huile sur la mer, panaches de fumées d'une usine, phénomènes atmosphériques). Les recherches autour de la coordination d'une flotte de drones et de l'exploration d'environnements dynamiques ne sont pas encore abouties et de nombreuses contributions peuvent être apportées aux problématiques courantes dans ce domaine.

L'objectif de cette thèse est d'apporter des solutions et des stratégies afin d'explorer un environnement dynamique tel que l'évolution d'un nuage avec une flotte de drones, permettant ainsi d'assurer une meilleure couverture temporelle et spatiale qu'avec un drone unique. Ceci impose le développement d'une architecture de contrôle et de planification des drones qui assure leur coopération pour mener au mieux la mission. Les contraintes liées à ce type d'environnement et de mission limitent le travail collectif de la flotte. Pour des raisons de robustesse et d'efficacité, les mécanismes du système sont réalisés de manière distribuée où les drones embarquent les processus de planification, communiquent directement entre eux et non par l'intermédiaire d'une station unique.

Cette thèse a été réalisée en étroite collaboration avec le projet NEPHELAË qui a pour objectif de collecter des données dans des cumulus afin de reconstruire un modèle spatio-temporel 4D de son évolution. Sachant que les motifs de vol classiques utilisés dans les autopilotes ne sont pas efficaces pour explorer des environnements aussi dynamiques, la contribution principale de cette thèse est le développement et l'implémentation dans le système PAPAZZI de motifs de vol adaptatifs. Ces schémas de vol utilisent les mesures des capteurs en temps réel pour adapter les trajectoires du drone au nuage à cartographier. Cette action est réalisée à bord du drone et sans intervention d'un opérateur. Le comportement du drone change selon le motif employé, permettant le suivi de la bordure du nuage, la construction d'une carte 3D dense ou encore la détermination du cœur du nuage.

La validation de ces nouvelles fonctions de navigation a été réalisée à travers

différentes simulations combinant des drones simulés dans un environnement nuageux statique puis dynamique. Par la suite, une première expérimentation hybride a été réalisée avant de déployer la flotte lors d'une campagne de mesures à la Barbade début 2020. Cette campagne a permis d'effectuer un grand nombre de vols d'exploration et de suivi de nuages dans des conditions réelles. En plus d'apporter des résultats et des pistes d'améliorations sur les schémas de vol adaptatifs, elle a permis aux scientifiques de l'atmosphère de collecter des données importantes sur les nuages qui n'avaient pas été observées jusqu'à aujourd'hui. Cette expérimentation a notamment permis de suivre une bordure de nuage avec plusieurs drones en simultané et de réaliser ainsi une première en termes de collecte de données dans un nuage.

Mots clés : Drone, robotique, architecture distribuée, mission multi-robots, exploration environnement dynamique, navigation adaptative

Adaptive flight patterns for clouds exploration with a fleet of UAVs : principle, implementation and experiments

Abstract : Atmospheric scientists are constantly seeking to acquire new data that can improve their models of atmospheric phenomena, especially clouds. Current methods are insufficient to collect adequate measurements of cloud dynamics and microphysical parameters related to cloud formation, generating large uncertainties in model formulation. This lack of in-situ data leads meteorologists to find new collection methods.

The use of UAVs is now widespread and many applications are emerging in different contexts. Although the use of a single UAV is very popular, the deployment of UAV fleets is still uncommon and is mainly limited to exploring and mapping unknown static environments. A fleet could find its usefulness in other more complex applications such as the monitoring of dynamic phenomena (e.g. oil puddles on the sea, plumes of smoke from a factory, atmospheric phenomena). Research on the coordination of a UAV fleet and the exploration of dynamic environments is not yet complete and many contributions can be made to the current problems in this field.

The objective of this thesis is to provide solutions and strategies to explore a dynamic environment such as the evolution of a cloud with a fleet of UAVs, thus providing better temporal and spatial coverage than with a single UAV. This calls for the development of a UAV control and planning architecture that ensures the cooperation of UAVs to carry out the mission in the best possible way. The constraints associated with this type of environment and mission limit the collective work of the fleet. For robustness and efficiency reasons, the system's mechanisms are implemented in a distributed manner, where the UAVs embark the planning processes and communicate directly with each other, rather than through a single station.

This thesis was carried out in close collaboration with the NEPHELAE project which aims to collect data in cumulus clouds in order to reconstruct a 4D spatio-temporal model of its evolution. Knowing that classical flight patterns used in autopilots are not efficient to explore such dynamic environments, the main contribution of this thesis is the development and implementation in the PAPAZZI system of adaptive flight patterns. These flight patterns use real-time sensor measurements to adapt the UAV trajectories to the cloud to be mapped. This action is performed onboard the UAV and without the intervention of an operator. The drone's behavior changes according to the pattern used, enabling the tracking of the cloud edge, the construction of a dense 3D map or the determination of the cloud core.

The validation of these new navigation functions was carried out through different simulations combining UAVs simulated in a static then dynamic cloud environment. Subsequently, a first hybrid experiment was carried out before deploying the fleet during a measurement campaign in Barbados in early 2020. This campaign enabled

a large number of exploratory flights and cloud tracking in real conditions. In addition to providing results and suggestions for improvements in adaptive flight patterns, it allowed atmospheric scientists to collect important data on clouds that had not been observed until today. In particular, this experiment made it possible to follow a cloud edge with several UAVs simultaneously, thus achieving a first in terms of data collection in a cloud.

Keywords : UAV, robotic, distributed architecture, multi-robots mission, dynamic environment exploration, adaptive navigation
