



HAL
open science

Vol en formation sans formation: contrôle et planification pour le vol en formation des avions sans pilote

Gautier Hattenberger

► **To cite this version:**

Gautier Hattenberger. Vol en formation sans formation: contrôle et planification pour le vol en formation des avions sans pilote. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008. Français. NNT: . tel-00353676

HAL Id: tel-00353676

<https://theses.hal.science/tel-00353676>

Submitted on 16 Jan 2009

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.

Vol en Formation sans Formation :

contrôle et planification pour le vol en formation des avions sans pilote

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 24 janvier 2008

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Toulouse

délivrée par l'Université Toulouse III - Paul Sabatier
Spécialité Systèmes Embarqués

par

Gautier HATTENBERGER

Composition du jury

Présidente : Marie-Pierre Gleizes

Rapporteurs : Amal El Fallah Seghrouchni
Éric Feron

Examineurs : Marie-Claire Charmeau
Pascal Brisset
Simon Lacroix (Directeur de thèse)

Invités : Bruno Patin
Rachid Alami (Directeur de thèse)

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Je voudrais en premier lieu remercier Messieurs Rachid Alami et Simon Lacroix, Directeurs de recherche au CNRS, pour m'avoir accueilli dans leur équipe et pour avoir dirigé mes travaux tout au long de mon doctorat. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie également Monsieur Bruno Patin, ingénieur chez Dassault-Aviation, qui a initié et soutenu la participation financière de ce travail de recherche, ainsi que Monsieur Stéphane Millet. Cette collaboration avec un partenaire industriel a été pour moi particulièrement riche d'enseignements.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à Madame Marie-Pierre Gleizes, Professeur à l'Université Paul Sabatier, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse. Qu'elle soit également remerciée de l'intérêt qu'elle a porté à mes travaux.

Je remercie vivement Madame Amal El Fallah Seghrouchni, Professeur à l'Université Paris VI et Monsieur Éric Féron, Professeur à Georgia Tech, qui ont accepté d'être les rapporteurs de ce travail et qui ont ainsi contribué à l'améliorer.

Merci également à Madame Marie-Claire Charneau, ingénieur au CNES pour sa contribution à l'enrichissement de ma réflexion et sa participation à mon jury de thèse.

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur Pascal Brisset, enseignant-chercheur à l'ENAC, non seulement pour avoir accepté de faire partie de mon jury, mais surtout pour toute l'aide qu'il m'a apporté avec les membres de l'équipe « Drones » de l'ENAC. Sans eux, la partie théorique de cette thèse aurait été probablement privée de sa réalisation expérimentale, fondamentale pour confronter la recherche en robotique avec la réalité.

Bien que la collaboration du LAAS avec Monsieur Luc Lotteau n'ait pu aboutir dans les termes espérés, je tiens à souligner sa gentillesse, sa disponibilité et l'important travail de mise au point qu'il a accompli. Les erreurs commises ont été riches d'enseignement.

Que mes parents, oncle et tante et M^{lle} Aurélie Pichot soient remerciés pour leur attentive et patiente relecture du manuscrit.

Enfin, je remercie les ingénieurs du LAAS, Messieurs Jérôme Manhes et Matthieu Herrb, pour leur aide à la mise en œuvre des robots, mes camarades de thèse, Vincent, Matthieu, Cyril, Panos et surtout Sylvain pour son assistance en informatique, et enfin toutes les personnes sympathiques que j'ai croisé dans les couloirs du LAAS et pendant la pause de 16 h :)

Bien sûr, je n'oublie pas toutes les personnes qui me sont proches, ma compagne Émilie, mes camarades de l'Ensica pour leur bonne humeur et leur humour fin, et bien sûr toute ma famille. Leur soutien fut une aide précieuse pendant ces trois années. Merci à tous !

à mon grand-père,

*I know not with what weapons World War III will be fought,
but World War IV will be fought with sticks and stones.*

Albert Einstein

Table des matières

Table des figures xi

Avant-propos	1
---------------------	----------

Chapitre 1

Introduction	3
---------------------	----------

1.1	Motivation	3
1.2	Objectifs	5
1.3	Contributions	5
1.4	Organisation du document	6

Chapitre 2

Présentation du vol en formation	8
---	----------

2.1	Qu'est ce qu'une formation ?	8
2.2	Déplacements en formation en robotique	10
2.2.1	Les robots terrestres	10
2.2.2	Les satellites	10
2.2.3	Les robots aquatiques	11
2.2.4	Les robots aériens	11
2.3	Pourquoi faire du vol en formation ?	13
2.4	Les applications du vol en formation	16
2.4.1	Applications militaires	16
2.4.2	Applications civiles	17
2.5	Les différentes notions liées à la formation	17

2.5.1	La stabilité	18
2.5.2	La commandabilité	18
2.5.3	Les communications	19
2.5.4	Les stratégies de commande	19
2.6	Bilan	23

Chapitre 3	
Missions pour formations de drones en environnement hostile	24

3.1	Présentation des missions	24
3.1.1	Les différents types de mission	24
3.1.2	Les objectifs de mission	26
3.1.3	Organisation d'un dispositif multi-formations	27
3.2	Modélisation du terrain	29
3.3	Modélisation des menaces sol/air	30
3.4	Modélisation des drones et de leurs systèmes	31
3.4.1	Les avions	32
3.4.2	Le système de communication	33
3.4.3	Les systèmes d'auto-protection et équipements associés	33
3.4.4	Les armements et équipements associés	36
3.5	Modélisation des points de passage et des contraintes tactiques	37
3.5.1	Les points de passage	37
3.5.2	Les contraintes internes	38
3.5.3	Les contraintes externes	38
3.6	Positionnement du problème	39

Chapitre 4	
Une approche pour la planification et le contrôle d'une formation	41

4.1	Une couche intermédiaire pour la formation	41
4.1.1	Utilité d'une couche de formation	41
4.1.2	Les fonctions réalisées par la couche de formation	42
4.1.3	Les éléments mis en œuvre dans la gestion de la configuration	43

4.1.4	Mise en œuvre de la couche de formation	45
4.2	Architecture	48
4.3	Bilan	50

Chapitre 5	
Gestion autonome de la configuration	51

5.1	La génération de trajectoire	51
5.2	La phase d’initialisation	53
5.2.1	La <i>timeline</i>	53
5.2.2	L’allocation des brouilleurs offensifs	53
5.3	Le placement des <i>slots</i>	58
5.3.1	Placement paramétrique des brouilleurs offensifs	58
5.3.2	Placement des <i>slots</i> restants	60
5.3.3	Mouvements réactifs	60
5.3.4	L’allocation des brouilleurs défensifs	63
5.4	Les manœuvres de séparation	65
5.5	Bilan	66

Chapitre 6	
Planification et contrôle des déplacements au sein d’une formation	67

6.1	L’affectation de <i>slots</i>	67
6.1.1	Objectifs	67
6.1.2	Initialisation	68
6.1.3	Itération	69
6.1.4	Performances	70
6.2	Les trajectoires de reconfiguration	71
6.2.1	Objectifs	71
6.2.2	L’algorithme A* multi-robots	72
6.2.3	Améliorations	75
6.2.4	Lissage	77
6.2.5	Performances	79

6.3	Le contrôle de la formation	81
6.3.1	Objectifs	81
6.3.2	Le suivi de trajectoire et le contrôle de formation	82
6.3.3	Les communications dans la formation	86
6.3.4	Performances de l’asservissement réactif	87
6.4	Bilan	90

Chapitre 7	
Expérimentations	93

7.1	Implémentation	93
7.1.1	Le module <i>RIDE</i>	93
7.1.2	L’architecture LAAS	94
7.1.3	La communication avec <i>YARP</i>	95
7.2	Résultats de simulation	96
7.2.1	Le support mutuel	97
7.2.2	La protection contre les radars de veille	98
7.2.3	La reconfiguration	100
7.2.4	Simulation pour de grandes formations	101
7.2.5	Simulations dans un environnement réaliste	101
7.3	Expérimentations réelles	102
7.3.1	Présentation	102
7.3.2	Résultats	103
7.4	Bilan	106

Conclusion et perspectives	107
-----------------------------------	------------

Annexe A	
Le système <i>Paparazzi</i>	109

A.1	Hardware	110
A.2	Software	111

Bibliographie	114
----------------------	------------

Table des figures

1	Maurice Percheron inventa les drones dans les années 20.	2
2	Schéma d'un drone imaginé par Maurice Percheron.	2
2.1	La Patrouille de France en virage à droite.	9
2.2	Répartition des drones en fonction de leur taille et de leur endurance	12
2.3	Le drone HALE Global Hawk américain.	13
2.4	Le Predator américain.	13
2.5	La maquette du nEUROn au salon du Bourget.	13
2.6	Le démonstrateur x45-A de Boeing en vol avec un F18.	14
2.7	Le premier vol du démonstrateur x47-A de Northrop Grumman.	14
2.8	Le drone Sperwer peut décoller depuis une rampe de lancement.	14
2.9	Notation pour le contrôleur $l - \psi$ {Desai <i>et al.</i> , 1998}.	21
2.10	Notation pour le contrôleur $l - l$ {Desai <i>et al.</i> , 1998}.	21
3.1	Organisation d'une architecture multi-formation.	29
3.2	Zone de détection des radars de veille et de tirs.	31
3.3	Système de protection autour d'une cible.	31
3.4	Effet d'un brouilleur offensif sur un radar de veille.	34
3.5	Effet d'un brouilleur défensif sur un radar de tir.	34
3.6	Les 4 secteurs en gisement pour le système d'auto-protection.	35
3.7	Largage de leurres infrarouges (flare).	36
3.8	Leurres électromagnétiques (chaff) avec leurs douilles.	36
3.9	Exemple de scénario.	40
4.1	Positionnement de la couche intermédiaire de formation.	42

4.2	Gestion de la configuration.	45
4.3	Processus de mise à jour de la configuration.	47
4.4	Architecture.	48
4.5	Couche de formation.	49
5.1	Deux exemples de trajectoires pour les combinaisons <i>DLG</i> et <i>DGD</i>	52
5.2	Trajectoire avec les trois différents types de point de passage.	53
5.3	Exemple de <i>timeligne</i> avec trois contraintes.	54
5.4	Exemples d’allocations.	55
5.5	Exemple de zones protégées par un <i>BO</i>	55
5.6	Algorithme <i>Branch & Bound</i>	58
5.7	Différents cas possibles pour placer des <i>slots</i> à partir de positions existantes.	61
5.8	Force d’attraction pour les brouilleurs défensifs.	62
5.9	Exemple de configuration.	64
6.1	Graphe de recherche par l’algorithme <i>Branch & Bound</i>	70
6.2	Exemple de configuration initiale et finale pour une reconfiguration.	73
6.3	Le maillage du A^*	74
6.4	L’algorithme de planification de trajectoires multi-robots à base de A^*	76
6.5	Une chaîne de masselottes.	78
6.6	Temps de calcul moyen pour la reconfiguration.	80
6.7	Comparaison des temps de calculs pour différents pas de déplacement.	81
6.8	Les conventions pour le suivi de trajectoire.	83
6.9	Les conventions d’orientation des angles.	85
6.10	Représentation des coefficients pour le contrôle réactif.	85
6.11	Décomposition de la force globale dans le repère avion pour le contrôle réactif.	86
6.12	Mesure de l’écart par rapport à une configuration de référence.	87
6.13	Robustesse du contrôle de formation aux pertes de communication.	88
6.14	Cas 1.	89
6.15	Cas 2.	89
6.16	Cas 3.	89
6.17	Cas 4.	91

6.18	Cas 5.	91
6.19	Cas 6.	91
6.20	Cas 7.	91
6.21	Cas 8.	91
7.1	L'architecture <i>LAAS</i>	94
7.2	L'implémentation de l'architecture <i>LAAS</i>	95
7.3	Les communications entre les engins dans notre architecture.	96
7.4	Simulation de support entre deux UAVs pour le brouillage défensif.	97
7.5	Comparaison de l'efficacité du brouillage défensif.	98
7.6	Simulation pour le brouillage offensif.	99
7.7	Exécution des trajectoires de reconfiguration en simulation.	100
7.8	Simulation avec une formation à 8 UAVs.	101
7.9	L'interface graphique du simulateur Artemis.	102
7.10	Le prototype <i>Lhassa</i>	103
7.11	Les deux premiers avions <i>Nirvana</i> N1 et N2 équipés du système <i>Paparazzi</i>	103
7.12	Les écarts enregistrés lors du premier vol.	104
7.13	Les avions N1 et N2 pour leur premier vol en formation.	104
7.14	Les écarts enregistrés, sans force latérale et avec des changements manuels de configuration.	104
7.15	Écarts enregistrés avec force latérale.	104
7.16	Les écarts enregistrés pour une formation de 3 UAVs.	105
7.17	La visualisation des trajectoires en 3D.	105
7.18	Trois avions en formation.	106
A.1	Les différents composants du système <i>Paparazzi</i>	109
A.2	La carte de contrôle <i>tiny</i> avec son GPS.	110
A.3	Le capteur infrarouge horizontal 2 axes.	110
A.4	Principe de mesure de l'angle par les capteurs infrarouges.	111
A.5	Un avion équipé du système <i>Paparazzi</i>	111
A.6	Les boucles de contrôle de <i>Paparazzi</i>	112
A.7	L'interface graphique de la station sol de <i>Paparazzi</i>	113
A.8	La communication entre les agents du système <i>Paparazzi</i>	113

Avant-propos

CE RAPPORT présente les travaux de thèse que j'ai effectués au *Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes* (LAAS-CNRS) à Toulouse, de novembre 2004 à octobre 2007, sous la direction de MM. Rachid Alami, directeur de recherche au CNRS, et Simon Lacroix, chargé de recherche au CNRS. Le sujet de ma thèse porte sur le contrôle et la planification du vol en formation pour des avions sans pilote en environnement hostile. Cette étude a été co-financée par *Dassault Aviation* et le CNRS, dans le cadre d'une bourse BDI. L'objectif était de concevoir, développer et évaluer des méthodes de contrôle d'une flotte d'avions autonomes par une validation expérimentale sur des maquettes volantes.

Le problème que nous a soumis *Dassault Aviation* était initialement très large et couvrait aussi bien la planification de missions pour plusieurs formations d'engins que la commande de vol. Leurs ingénieurs avaient également l'idée de faire du « vol en formation sans formation ». Derrière cette phrase, assez originale, on trouve l'habitude des pilotes militaires de voler en formation selon des géométries très précises alors que les avions sans pilote, qui ont des contraintes différentes, ne sont plus tenus à une telle rigueur. Ceci a permis de concentrer nos recherches sur un aspect bien précis et jusque là assez peu abordé dans la littérature : le choix d'une configuration adaptée à l'environnement dans le but d'améliorer l'efficacité et la sécurité d'une flotte de drones.

Un aspect important portait sur la mise en œuvre d'une plate-forme d'expérimentation afin de valider les solutions retenues. La réalisation d'un prototype a été au final beaucoup plus longue et difficile que prévue, mais ô combien riche d'enseignements ! Au début du projet, l'offre commerciale pour ce type d'engin n'avait pas encore atteint la maturité nécessaire pour répondre à nos besoins. La réalisation d'un prototype « sur mesure » a donc été lancée, mais en voulant trop rapidement un produit d'une grande complexité, nos espérances ont été déçues. Entre temps, des solutions plus simples et plus souples d'utilisation avaient fait leur apparition, nous permettant de mener à bien des expérimentations.



FIG. 1 – Maurice Percheron inventa les drones dans les années 20.

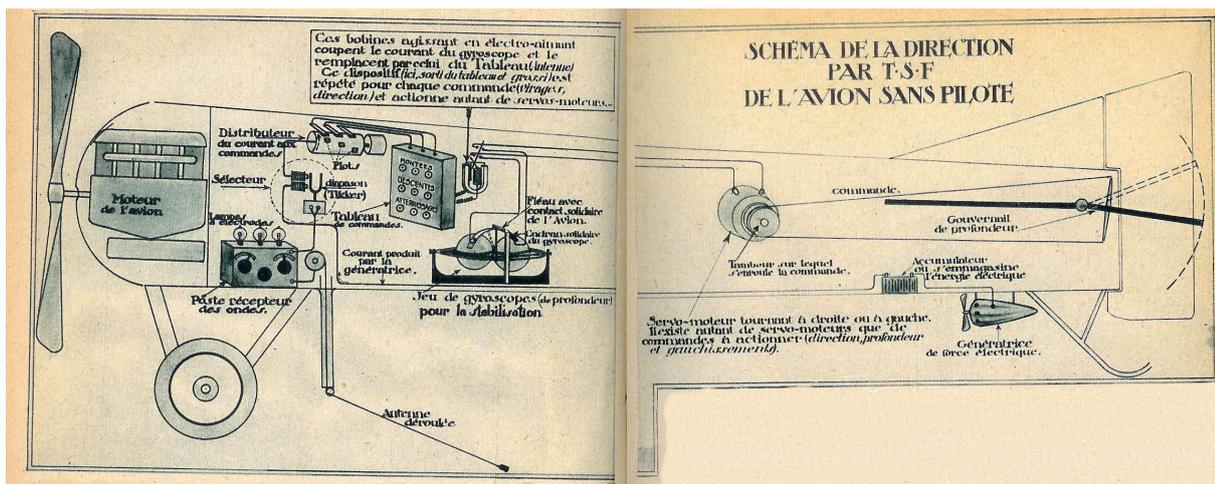


FIG. 2 – Schéma d'un drone imaginé par Maurice Percheron.

Chapitre 1

Introduction

LE SUJET de cette thèse est le contrôle et la planification d'une formation d'avions sans pilote. L'accent est mis sur la phase de convoyage d'engins militaires dans un environnement hostile et partiellement connu. Le groupe d'avions doit être capable de s'adapter de façon autonome à la situation tactique. L'objectif est d'améliorer l'efficacité et la sécurité de la formation.

Ce chapitre présente la motivation, les objectifs et les contributions de cette étude.

1.1 Motivation

Les engins aériens sans pilote existent depuis longtemps et leur domaine d'application n'a cessé de croître ces dernières années. Développés à l'origine par les militaires, on les trouve aujourd'hui dans différentes activités telles que la surveillance des frontières, la protection civile, l'agriculture, le cinéma. . . Sur le plan militaire, ces engins ont atteint le stade de la production industrielle avec des avions comme le Predator ou le Global Hawk. Ils ne se limitent d'ailleurs plus à de simples missions d'observation et sont désormais équipés de systèmes d'armes mis en œuvre sur les champs de bataille. De nouvelles applications sont à l'étude, aussi bien pour des avions de grande envergure que pour des micro-drones capables d'assister les soldats sur le terrain.

Ces engins volants sont très différents et les missions qui leurs sont confiées sont de plus en plus variées. Leur préparation devient par la même occasion plus complexe. Il faut être

capable de définir des trajectoires avec des points de passage pour tous les avions évoluant sur la zone de conflit. Il faut tenir compte des tâches particulières à accomplir en fonction des objectifs de la mission. L'environnement est, par définition dans ce type d'application, hostile et incertain. Notamment la présence de menaces et de systèmes de détection doit être intégrée dans la construction de la mission. Enfin, les aléas au cours de l'exécution peuvent nécessiter une replanification en ligne de la mission.

Bien que la navigation autonome d'un drone isolé pose encore quelques défis pratiques, les technologies utilisées ont fait leurs preuves et ont aujourd'hui une bonne maturité. Les développements sont donc naturellement orientés vers la résolution de nouveaux problèmes et en particulier le contrôle de plusieurs engins autonomes. L'application qui vient immédiatement à l'esprit est celle du *vol en formation*. Les premières questions que l'on se pose sont : « Comment assurer la sécurité des avions ? » ou « Comment faire pour respecter une géométrie donnée ? » Ces questions relèvent de ce qu'on peut qualifier de *stratégies de commandes* et sont à l'origine de très nombreuses études, tant théoriques que pratiques. Bien qu'elles ne soient pas au centre de cette étude, y répondre est un passage obligé, et assez délicat, pour arriver à une expérimentation réelle.

De ces deux aspects, la planification de mission et le contrôle de formation, ressort une question importante qui pourtant est très peu abordée dans la littérature : « Qui détermine la configuration de la formation ? » Cette préoccupation peut paraître anodine. Et pourtant : est-ce le rôle de la planification de mission, au risque de compliquer inutilement sa tâche déjà lourde, ou celui du contrôle de formation, qui, lui, n'est pas supposé avoir de connaissance de la situation tactique ? Notre approche consiste à proposer une *couche intermédiaire* dédiée à la gestion de la formation et de sa configuration pour l'adapter de façon automatique à l'environnement. Ce système comporte un certain nombre de contraintes opérationnelles. En particulier, les algorithmes qu'il met en œuvre doivent pouvoir fonctionner en temps réel sur des calculateurs embarqués. Il faut également être robuste à la perte de certains avions, ce qui nécessite un partage des données critiques et des redondances.

L'une des innovations de cette approche est de considérer comme entrées du système des *points de passage* et des *contraintes tactiques* telles que des distances minimales entre avions ou la présence de menaces particulières. Ainsi, la planification de mission peut considérer la formation comme un tout et utiliser des techniques de planification identiques aux cas classiques mono-robots. La sortie du système est une séquence de configurations géométriques pour le groupe d'avions qui peut alors utiliser des méthodes de contrôle déjà bien connues.

Cette étude aborde brièvement les aspects de planification de mission et de contrôle de formation, de façon à bien cadrer le contexte des missions et les problèmes pratiques du vol en formation. Elle se focalise essentiellement sur la description du fonctionnement et des algorithmes de la couche intermédiaire de formation, qui correspond à l'idée de « planification de formation ».

1.2 Objectifs

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- cerner le contexte opérationnel de la planification de mission pour des formations d’avions sans pilote afin d’identifier les composants à mettre en œuvre pour une gestion plus performante ;
- étudier et proposer des solutions et des algorithmes pour le contrôle d’une formation d’avions sans pilote, dans le but d’améliorer son efficacité et sa sécurité en s’adaptant à l’environnement ;
- analyser les performances des algorithmes et les bénéfices d’une adaptation automatique de la configuration d’une formation ;
- mettre en œuvre des plateformes d’expérimentation, c’est-à-dire des avions capables de voler de façon autonome et de communiquer entre eux ;
- réaliser une validation expérimentale des algorithmes développés à travers différents outils de simulation et par des expérimentations réelles.

1.3 Contributions

Les principales contributions de cette thèse, avec les références associées, sont :

- une approche globale pour le contrôle d’une formation, avec la possibilité de réaliser des reconfigurations et d’allouer des emplacements, ou *slots*, aux avions dans la formation en tenant compte de certaines contraintes {Hattenberger *et al.*, 2006} ;
- une méthode de sélection de la configuration à partir de contraintes tactiques, fournies par une couche délibérative supérieure, d’un modèle des menaces et en s’appuyant sur différents modes de déplacements {Hattenberger *et al.*, 2007a} ;
- la mise en place d’une architecture logicielle, basée sur l’architecture LAAS {Alami *et al.*, 1998a}, pour réaliser des simulations réalistes {Hattenberger *et al.*, 2007b} aussi bien que les expérimentations réelles ;

Les outils que nous avons mis en œuvre ou réalisés sont :

- une bibliothèque C++ rassemblant les algorithmes de génération de trajectoires et de gestion de la configuration d’une formation ;
- l’intégration des algorithmes dans le simulateur Artemis de *Dassault Aviation* ;



- le montage de maquettes de modélisme *Minimag* de chez *Multiplex* et l’installation d’une électronique de vol *Paparazzi* développée par l’*École nationale de l’aviation civile* (ENAC) {Brisset *et al.*, 2006}.

1.4 Organisation du document

Outre ce premier chapitre d’introduction est destiné à définir les objectifs de l’étude, à mentionner les contributions et à présenter l’organisation du document, ce rapport est structuré en six chapitres :

- Dans le deuxième chapitre, une présentation du vol en formation permet de se familiariser avec les différentes notions qui s’y rattachent. Après avoir défini ce qu’est une formation, nous passons en revue les différents types de robots, qu’ils soient terrestres, aériens, spatiaux ou navals, qui sont amenés à évoluer en formation. Puis, nous nous attachons au cas du vol en formation en particulier, et de son intérêt. Les différentes notions de stabilité, de communication et de stratégie de commandes sont abordées, ainsi que les différentes applications du vol en formation.
- Le troisième chapitre présente le contexte de notre étude, c’est-à-dire les missions pour formation de drones en environnement hostile. Les différents types de missions sont présentés, ainsi qu’une modélisation des éléments : terrains, menaces, avions et équipements associés.
- Le quatrième chapitre décrit l’approche pour résoudre le problème qui nous occupe, à savoir la conception d’une couche intermédiaire entre la planification de mission et le contrôle d’une formation. La procédure de sélection d’une configuration est décrite en détail et les choix justifiés, au vu des contraintes de réalisation pratique pour le calcul embarqué. Une architecture apte à supporter nos algorithmes tout en garantissant un bon fonctionnement du système est présentée.
- Dans le cinquième chapitre, la procédure de sélection d’une configuration est décrite en détail, ainsi que les différents algorithmes mis en jeu. Les solutions que nous avons retenues se basent sur les définitions des contraintes et des menaces, mais surtout sur les hypothèses faites sur le comportement de ces dernières.
- Le sixième chapitre présente les algorithmes dédiés à la « réalisation » du vol en formation, à savoir l’affectation des emplacements d’une configuration aux avions, le calcul de trajectoire de reconfiguration et le contrôle du vol en formation à proprement parler. L’analyse des performances des algorithmes les plus critiques permet une validation des choix effectués.
- Enfin, l’implémentation et les expérimentations, simulées et réelles, sont présentées dans le

septième chapitre. Le concept de simulation hybride est également présenté. Il permet d'introduire des éléments virtuels, comme des menaces ou des avions, dans un environnement d'expérimentation réelle.



Chapitre 2

Présentation du vol en formation

DANS ce chapitre, nous allons proposer dans un premier temps une définition de ce qu'est une formation. Ensuite, nous verrons quels robots peuvent tirer parti d'une formation, principalement dans le cas des engins volants. Les différents concepts de stabilité, contrôlabilité et stratégies de commande sont aussi présentés.

2.1 Qu'est ce qu'une formation ?

Dans la mise en œuvre d'un système multi-robots {Dudek *et al.*, 1996}, nous pouvons distinguer deux types de comportements :

- les comportements *compétitifs*, où chaque robot cherche à améliorer ses performances au détriment des autres, plus ou moins volontairement ;
- les comportements *collaboratifs*, où les robots prennent en considération les objectifs des autres afin d'améliorer un résultat global.

Les cas qui nous intéressent sont de type collaboratif. On peut distinguer plusieurs niveaux dans la collaboration entre robots :

- La coordination est la forme la plus simple. Elle consiste essentiellement à synchroniser les actions des différents robots de façon à respecter l'ordre des tâches d'un plan global. Chaque robot a ses buts et sa liste de tâches propres. Un exemple de coordination est la régulation du trafic aérien de façon à éviter les collisions entre avions dont les plans de vol sont indépendants.
- La coopération vise à mettre en œuvre plusieurs robots pour réaliser une tâche commune. Cette situation peut venir du fait qu'un robot seul n'a pas la capacité ou les outils pour

réaliser la tâche demandée. La coopération implique évidemment d'avoir une bonne coordination entre les robots. Nous verrons par la suite des situations où un système de brouillage radar est transporté par un avion et des armes par un autre, ces systèmes étant trop encombrants pour être portés par un seul engin. La coopération peut être une action ponctuelle au cours de l'exécution des missions des robots, ou s'étendre sur une plus longue période.

- La formation est un cas particulier de coopération. Au cours d'un déplacement en formation, les robots conservent un but commun en terme de position à atteindre ou de trajectoire à réaliser. De plus, ce déplacement se fait dans un espace de dimensions réduites. L'objectif est de pouvoir réaliser à tout moment des tâches en coopération, les robots assurant la coordination spatiale et temporelle. Ce type de déplacement est très bien adapté au convoyage d'un ensemble de robots.

Dans notre cadre d'étude, nous proposons la définition suivante d'une formation :

Définition : Une formation est une organisation d'un groupe d'engins se déplaçant ensemble, dans un espace restreint, et partageant des buts et des contraintes.

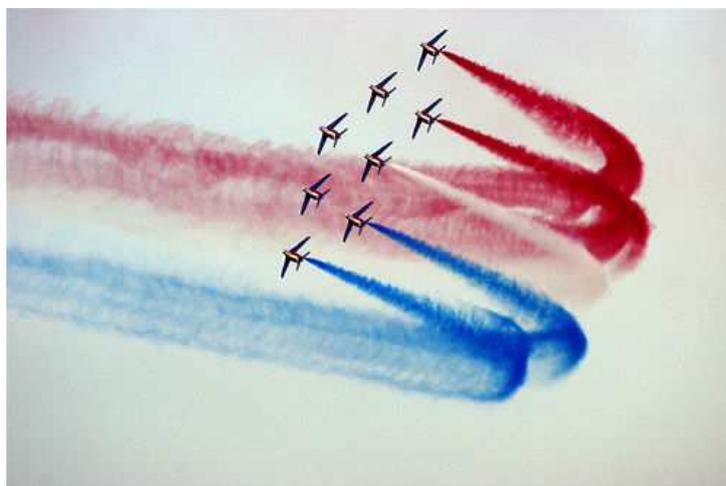


FIG. 2.1 – La Patrouille de France en virage à droite.

Au cours d'un déplacement en formation, nous pouvons définir de façon géométrique les relations de distance entre les robots. La géométrie d'une formation, si elle peut avoir un objectif esthétique lors des meetings aériens (figure 2.1), doit avant tout avoir un intérêt pratique d'amélioration de l'efficacité et de la sécurité du groupe. Notre objectif est de déterminer une géométrie adaptée à l'environnement en s'affranchissant des schémas classiques tels que les formations en « V » ou en « diamant ».



2.2 Déplacements en formation en robotique

L'utilisation d'une formation ne se limite pas aux engins volants et il convient d'observer la diversité des systèmes où ce type de contrôle est mis en œuvre. Nous faisons ici la distinction en fonction du milieu dans lequel évoluent les robots.

2.2.1 Les robots terrestres

L'utilisation de la formation pour les robots terrestres a été assez peu étudiée et essentiellement pour des systèmes simples. Les robots mobiles holonomes {Balch et Arkin, 1998} ou non-holonomes {Desai *et al.*, 1998} ont été largement utilisés pour démontrer l'efficacité de différentes méthodes. Balch et Arkin {1998} ont également proposé une expérimentation avec des véhicules militaires Hummer en environnement extérieur. La majorité des études porte sur la coordination et la coopération entre plusieurs robots autonomes comme dans le cadre du projet Martha {Alami *et al.*, 1998b} ou dans les travaux de Svestka et Overmars {1998}.

Une situation beaucoup plus intéressante se rapproche des problématiques de formation. La gestion automatique du trafic routier {Horowitz et Varaiya, 2000}, notamment le maintien de l'espacement entre les véhicules sur les voies rapides par exemple, n'est pas exactement un cas de formation tel qu'il est défini § 2.1. En effet, les véhicules ont des destinations indépendantes et rien n'impose de maintenir une proximité entre eux. Cependant, maintenir un espacement optimal lors de congestion permet de fluidifier le trafic tout en assurant la sécurité des personnes. Les questions de stabilité et de contrôle sont alors similaires à celles d'une formation.

2.2.2 Les satellites

Les constellations de satellites sont de plus en plus utilisées dans les domaines des télécommunications, du positionnement par satellites et de l'observation spatiale.

Les satellites de communication (télévision, internet...) sont le plus généralement placés sur orbite géostationnaire et doivent assurer un espacement constant entre eux tout en maintenant leurs antennes pointées vers la Terre. Les problématiques auxquelles sont confrontés ces systèmes relèvent purement d'un contrôle automatique. La configuration de la formation est très simple et ne change pas pendant la durée de service des satellites.

Les constellations de type GPS (Global Positioning System) ou téléphone par satellites sont sur des orbites basses ou moyennes. La problématique n'est plus ici de maintenir une formation serrée, mais de placer les satellites sur des orbites décalées et synchronisées, de façon à avoir la meilleure couverture au sol pour assurer une bonne qualité de service (il faut voir au moins quatre satellites GPS simultanément pour avoir une position).

Enfin, les systèmes d'observation de la Terre ou de l'espace utilisent de plus en plus des instruments placés sur des satellites différents. Dans le cas de l'interférométrie par exemple, la

qualité des mesures dépend de l'espacement entre plusieurs capteurs {Beard *et al.*, 2001}. Une formation de satellites permet d'obtenir un espacement à la fois important et variable, mais extrêmement précis, en utilisant des plateformes basiques de moindre coût.

Dans l'avenir, nous verrons probablement se développer des micro-satellites pour assister les astronautes dans la construction de stations orbitales ou pour effectuer des diagnostics ou des réparations autonomes lorsque l'humain n'est pas présent ou incapable d'intervenir. La coopération, la reconfiguration et l'évitement d'obstacles seront au centre de toutes les attentions, le moindre écart pouvant être fatal {Clark *et al.*, 2003}.

2.2.3 Les robots aquatiques

Les problématiques liées au contrôle de formation pour des robots marins sont très proches de celles des avions civils, avec néanmoins des dynamiques assez différentes. Les applications possibles sont le convoyage de plusieurs cargos avec des équipages réduits, la navigation automatique dans des zones de grand trafic (par exemple, le rail d'Ouessant) ou à l'approche des zones portuaires {Arrichiello *et al.*, 2006}. Des systèmes sous-marins exploitent eux aussi les déplacements en formation {Fiorelli *et al.*, 2004}.

Il existe par ailleurs des initiatives plus originales, telles que le contrôle d'une formation de robots poissons biomimétiques {Shao *et al.*, 2006}.

2.2.4 Les robots aériens

Les robots aériens ou drones (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) offrent une très grande variété de types. Ils sont généralement classés selon leur taille et leur endurance (voir figure 2.2). On peut ainsi distinguer les drones HALE (Haute Altitude Longue Endurance), les drones MALE (Moyenne Altitude Longue Endurance), les drones de courte et moyenne portée et les mini drones. Ils peuvent également être caractérisés par leur fonction : drones stratégiques, drones tactiques ou drones de combat (Unmanned Combat Air Vehicle,UCAV). Les types d'engins vont des avions à ailes fixes aux voilures tournantes, en passant par des systèmes hybrides.

Les drones stratégiques sont des drones HALE et ne sont pas vraiment concernés par les problématiques de vols en formation, car ils sont principalement destinés à des missions de reconnaissance ou de guerre électronique où un seul avion est généralement suffisant. Ils pourront néanmoins être intéressants à l'avenir dans le cas de ravitaillements en vol, où ils pourraient servir d'avions tanker. Le seul drone HALE connu aujourd'hui est le Global Hawk américain (figure 2.3).

Les drones tactiques concernent une très large gamme d'engins, allant des mini ou micro drones aux drones MALE. Ils sont donc amenés à exécuter un panel très large de missions. Le drone MALE le plus connu est le *Predator* américain (figure 2.4), qui a largué plusieurs fois des bombes ou missiles en Afghanistan en 2001, par exemple.



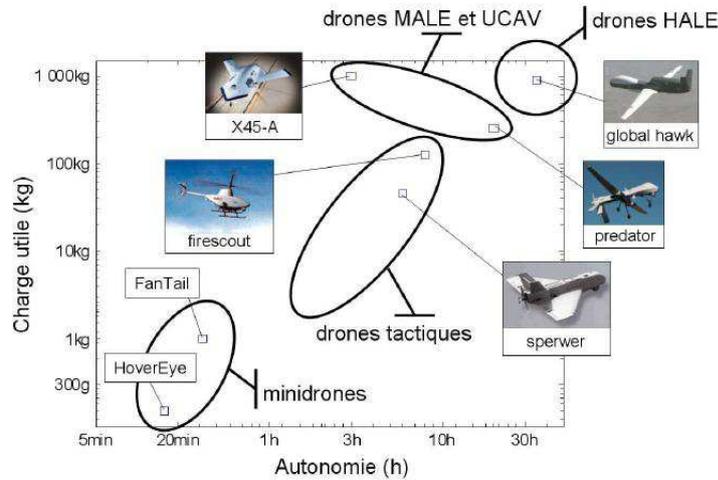


FIG. 2.2 – Répartition des drones en fonction de leur taille et de leur endurance

Ces engins doivent pourtant être différenciés des drones de combat UCAV, dont les caractéristiques techniques sont très différentes, avec une endurance bien plus faible et une masse au décollage équivalente à un avion d'arme classique (soit environ 10 tonnes contre 1,2 pour le Predator A). De nombreux programmes d'UCAV sont en cours aux États-Unis, avec les démonstrateurs x45 (figure 2.6) et x47 (figure 2.7), et en Europe, avec le projet de démonstrateur technologique nEUROn notamment (figure 2.5). Les missions de ces avions restent à définir avec précision {Bergé-Lavigne et Nogrix, 2006}. Ils seront très certainement dédiés aux missions d'attaque au sol et de pénétration en profondeur où les risques pour des pilotes seraient trop élevés. Pour le moment, aucune mission de type combat aérien n'est prévue pour ces engins. C'est par contre le type d'engin qui se prête le mieux au vol en formation, avec deux situations possibles : la ségrégation entre les missions UCAV et celles avec des avions pilotés, ou des opérations mixtes mêlant des avions pilotés appuyés par des drones d'escorte. La figure 2.6 montre un prototype x45 volant en formation avec un avion piloté F18.

Les drones tactiques de courte et moyenne portée sont destinés à surveiller le théâtre d'opération à plus petite échelle et à servir de relais de communication pour des troupes au sol ou d'autres UAVs. Ce type de drone est actuellement en service dans de très nombreux pays, dont l'armée française avec, par exemple, le Sperwer de Sagem (figure 2.8). Il s'agit le plus souvent de drones à voilure fixe, éventuellement lancés par une catapulte depuis un véhicule. Ces engins n'ont pas vocation à voler en formation, mais peuvent travailler en coopération.

Les mini-drones sont, comme leur nom l'indique, des drones de très petite taille. Ils doivent pouvoir être transportés par un fantassin, et seront utilisés dans les combats rapprochés pour collecter des données. Leur autonomie est relativement faible. Des capacités de vol stationnaire ou à faible vitesse sont généralement privilégiées. Bien que le vol en formation ne soit pas envisagé



FIG. 2.3 – Le drone HALE Global Hawk américain.



FIG. 2.4 – Le Predator américain.



FIG. 2.5 – La maquette du nEUROn au salon du Bourget.

à court terme pour ce type d'engin, ils pourraient permettre à l'avenir, en déployant un essaim de mini-drones sur une zone, d'établir rapidement un réseau de capteurs.

Les avions de ligne civils sont aujourd'hui très largement automatisés. Des techniques utilisées pour le vol en formation pourraient permettre de réduire l'espacement entre les avions, notamment en approche autour des aéroports {Haissig, 2004}, de façon à fluidifier le trafic aérien et augmenter la capacité de ces aéroports sans augmenter leur taille.

2.3 Pourquoi faire du vol en formation ?

Il n'a échappé à personne, lors du passage d'un groupe d'oiseaux migrateurs, que ceux-ci se déplacent le plus généralement en respectant une forme géométrique en V. Qu'est-ce qui pousse ces animaux à voler de la sorte ? Leur objectif étant de parcourir de très grandes distances,





FIG. 2.6 – Le démonstrateur x45-A de Boeing en vol avec un F18.



FIG. 2.7 – Le premier vol du démonstrateur x47-A de Northrop Grumman.



FIG. 2.8 – Le drone Sperwer peut décoller depuis une rampe de lancement.

parfois uniquement sur leurs réserves énergétiques, cette configuration vise à améliorer leurs performances en terme d'endurance. Les études en aérodynamique ont effectivement montré que les perturbations créées par l'oiseau de tête réduisent les efforts à fournir par ceux qui le suivent.

Les pilotes militaires ont utilisé depuis longtemps ce principe pour effectuer des patrouilles. Ils ont cependant d'autres critères à prendre en compte. Outre la hiérarchie de grade à respecter entre les pilotes, le vol en formation serrée permet de maintenir le contact visuel même à l'intérieur des nuages, les pilotes ne disposant pas d'autres sources d'information sur la position des autres engins que leur vue. Les drones ne sont pas soumis à de telles contraintes puisqu'ils échangent leurs positions par radio et qu'il n'y a pas de hiérarchie *a priori* entre eux. La question de la pertinence du vol en formation se pose donc pour des avions sans pilote.

Examinons dans un premier temps les avantages du vol en formation :

Gestion du trafic. Les avions volant dans un espace de dimensions réduites, la gestion du

trafic aérien est grandement facilitée car la formation est considérée dans son ensemble.

Furtivité. Le gain en furtivité d'une formation se retrouve à deux niveaux. D'une part, l'empreinte au sol est réduite du fait que les avions volent proches les uns des autres, d'autre part, la proximité entre les avions permet de réduire la puissance des systèmes de communication qui vont ainsi gagner en discrétion.

Consommation. Comme pour les oiseaux, le fait de voler dans certaines configurations permet de réduire la consommation des avions. Il faut néanmoins changer régulièrement l'avion de tête afin d'équilibrer les ressources dans la formation.

Répartition des charges. Une répartition de la charge utile et de la charge de travail (observation, planification, traitement des données...) permet de mettre en œuvre des avions de taille plus réduite et donc moins chers et plus discrets. L'utilisation d'équipements redondants entre les avions contribue à la robustesse du système.

Synchronisation. Le vol en formation permet de garantir l'arrivée de tous les avions en même temps sur le lieu d'exécution d'une tâche (attaque, observation...).

Bien sûr, il y a des inconvénients à voler en formation :

Sécurité. En faisant voler des avions à grande vitesse avec un faible espacement, la sécurité du vol devient difficile à garantir, notamment en cas de pannes matérielles des systèmes de communication. Un avion incapable de se synchroniser avec les autres doit pouvoir être écarté sans dommage pour le reste de la formation.

Communications. C'est le problème majeur des avions sans pilote. De façon à assurer la sécurité du vol, les échanges de données doivent se faire en continu, ce qui exclut de maintenir le silence radio, tout du moins en local. Des méthodes d'asservissement visuel ont été développées pour des robots mobiles au sol, mais il est difficile de les transposer à l'environnement en trois dimensions des drones avec des dynamiques beaucoup plus rapides, bien que des travaux soient prometteurs, comme dans le projet *Pegase*¹.

Consommation. Si les différences d'utilisation des ressources deviennent trop importantes, le groupe peut être amené à se séparer prématurément d'un avion, voire à remettre en cause la mission.

Bien qu'il y ait des inconvénients au vol en formation, ils sont largement compensés par les avantages. Il y a donc tout intérêt à voler en formation. Les avantages qui seront mis le plus à contribution dans cette étude sont la furtivité et la répartition des charges. Une solution où un groupe de drones serait envoyé par des chemins différents vers différents points de synchronisation est donc hors du contexte de nos travaux.

¹<http://dassault.ddo.net/pegase>



2.4 Les applications du vol en formation

2.4.1 Applications militaires

Il est évident que les utilisateurs privilégiés pour ce type de systèmes sont les militaires. De nombreuses études sont menées sur la planification de missions militaires pour des formations de drones de combat ou d'observation.

Degirmenciyan-Cartault *et al.* {2005} proposent un cadre pour la planification multi-agents à base d'automates hybrides. Le cycle présenté va de la modélisation du système à la validation des plans aux niveaux mono- et multi-agents. Le contrôle de l'exécution et des méthodes de replanification permettent de gérer les agents dans un environnement dynamique.

Le système de gestion proposé par Baltié *et al.* {2007} a pour objectif de planifier des missions pour des groupes de drones de combat en environnement hostile, en prenant en compte la coordination et la coopération entre les équipes. L'un des intérêts mis en avant par ce système est que la couche de décision et de contrôle mêle des comportements réactifs pour répondre aux aléas et de la planification pour la décision à plus long terme.

Dans {Bellingham *et al.*, 2001}, un système de planification multi-tâches et multi-drones est présenté. L'accent est mis sur l'allocation des tâches et la détermination de chemins optimaux pour atteindre les objectifs sélectionnés. Dans l'application proposée, les avions volent de façon indépendante et en coopération. Cependant le cas d'étude pourrait très simplement être étendu à une activité multi-formation basique. Une véritable planification multi-formations offre des possibilités de réorganisation et de gestion des ressources qui ne sont pas appréhendées par des systèmes multi-drones.

Le système de planification proposé par Sousa *et al.* {2004} prend en partie en compte ces aspects de multi-formations. Le principe est d'attaquer les menaces par vagues successives, de façon à ne pas dépasser un certain niveau de risque au cours de la mission. Cependant, il n'y a pas de remise en cause des objectifs finaux ni de réorganisations possibles. Le contrôleur d'exécution baptisé *SWIFT* permet de gérer les ressources d'une formation, mais ne se préoccupe pas pour autant de la configuration réellement adoptée par la formation.

Ces deux derniers systèmes font partie d'un projet américain financé par le DARPA, baptisé MICA (Mixed Initiative Control for Automa-teams). L'objectif est de concevoir et d'évaluer un contrôleur hiérarchique d'équipes semi-autonomes. Les missions sont spécifiées à un assez haut niveau et l'environnement est incertain, hostile et dynamique. Les cinq points principalement développés dans MICA sont :

1. une architecture hiérarchique pour des groupes d'engins semi-autonomes et distribués,
2. le contrôle d'engins hétérogènes,
3. la gestion des informations,
4. la confrontation à des événements incertains,

5. la présence d'interventions humaines dans la planification de mission et le contrôle d'exécution.

Ces cinq points sont cruciaux pour tout système devant gérer plusieurs formations d'UAVs. Le dernier point, notamment, n'est pas à négliger. En effet, même si un groupe a une très forte autonomie décisionnelle, il reste le maillon d'une longue chaîne comprenant notamment des agents humains au niveau de décision le plus haut. N'oublions pas qu'il s'agit de missions militaires, et qu'ici, peut-être plus qu'ailleurs, chaque décision d'attaque peut avoir de lourdes conséquences. De plus en plus, les drones ont des capacités offensives et ne sont plus seulement des systèmes d'observation. La décision d'attaquer, et plus important encore, celle d'annuler à tout moment une opération en cours, doit toujours revenir en dernier recours à un opérateur humain. La chaîne de commandement et la transmission des informations doit en conséquence être très souple et réactive.

Parmi les nombreuses phases d'une mission, on peut citer le cas de la phase de convoyage, où il s'agit d'emmener un groupe d'engins vers un point situé en zone hostile, afin d'y effectuer une tâche particulière. Le groupe de drones peut alors se retrouver exposé à des menaces, comme des radars de tir ou des radars de veille. C'est essentiellement dans le contexte d'une telle mission que les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés. On va notamment chercher à adapter la configuration de la formation durant cette phase dans le but de la rendre plus efficace.

2.4.2 Applications civiles

Il n'y a pas à notre connaissance de système de planification de missions civiles qui utilisent explicitement le vol en formation. Les architectures hiérarchiques sont, comme pour le cas militaire, très utiles afin de contrôler plusieurs engins hétérogènes avec un minimum d'opérateurs.

Une application classique est la détection et la surveillance des feux de forêt {Ollero *et al.*, 2005}. Généralement, seules les actions exécutées sur site sont considérées lors de la planification, ou alors la base au sol est proche du lieu d'intervention. Cependant, il n'y a pas besoin d'une phase de convoyage longue où le vol en formation pourrait être mis à profit.

C'est justement ces phases de convoyage qui semblent présenter un intérêt pour les applications civiles. Les études pour l'optimisation du trafic commercial sont nombreuses {Tomlin *et al.*, 1998; Haissig, 2004}. Afin de vraiment tirer parti du vol en formation, il faudrait imaginer des applications de surveillance ou de cartographie où des capteurs placés sur plusieurs avions doivent respecter une orientation et un espacement selon la zone à traiter.

2.5 Les différentes notions liées à la formation

Il y a plusieurs critères qui doivent être pris en considération pour la conception d'un contrôleur de formation, tels que la stabilité, la contrôlabilité, la sécurité et les aléas. Différentes



approches pour le contrôle ont été mises en avant pour résoudre ces problèmes, avec notamment les stratégies de leader-suiveur, les structures virtuelles ou les méthodes comportementales. Cette section aborde ces différentes notions, que l'on peut également retrouver synthétisées dans {Chen et Wang, 2005}.

2.5.1 La stabilité

La stabilité est la capacité d'un système à revenir naturellement dans une position d'équilibre après avoir reçu une perturbation. On peut distinguer trois concepts de stabilité différents, mais néanmoins reliés.

La stabilité de « corde » (string stability) concerne la propagation d'une perturbation dans une formation en colonne. Une colonne est stable si l'effet d'une perturbation à la source est amortie quand elle se déplace vers les suiveurs {Swaroop et Hedrick, 1996}. Pour des colonnes suffisamment longues, si la politique de contrôle requiert un espacement constant entre les véhicules, les informations venant à la fois du véhicule qui précède et du leader sont nécessaires. Ceci implique la mise en œuvre d'un réseau de communication au sein de la formation.

La stabilité de « grille » (mesh stability) est présentée par Pant *et al.* {2002} et garantit une atténuation des erreurs pour des systèmes interconnectés. De plus, la stabilité est préservée lorsque le système est agrandi suivant certaines conditions. Une application aux UAVs est proposée dans {Pant *et al.*, 2001}.

La stabilité LFS (leader-to-formation) {Tanner *et al.*, 2004} est basée sur l'approche leader-suiveur. Cette approche diffère de la stabilité de grille dans le sens où elle met davantage l'accent sur la façon dont le comportement du leader peut affecter les erreurs d'interconnexion dans la formation.

2.5.2 La commandabilité

La théorie des graphes est un outil important pour l'analyse de la stabilité d'une formation. Elle permet de représenter les interconnexions entre des robots et en particulier les échanges d'informations. La topologie d'un graphe permet d'étudier la stabilité, mais aussi la commandabilité du système. Un système est dit commandable si quel que soit l'état à l'instant initial, et quel que soit l'état à l'instant final, il existe une commande appliquée sur un intervalle de temps fini, qui permet de rejoindre l'état final partant de l'état initial. Il est également possible d'utiliser cette théorie pour choisir un contrôleur approprié à la configuration de la formation, s'il existe.

On peut trouver plusieurs exemples de l'utilisation de la théorie des graphes pour la formation dans la littérature. Dans {Fax et Murray, 2004}, un graphe orienté représente une formation d'agents dont les dynamiques sont données par des systèmes (identiques) linéaires à temps

invariant. Un critère est développé à partir des valeurs propres du Laplacien du graphe pour déterminer l'effet de la topologie des communications sur la stabilité. Dans {Lafferriere *et al.*, 2004}, les véhicules échangent des informations selon un graphe non orienté, spécifié à l'avance. La preuve est apportée qu'une stabilisation par retour d'état est toujours possible si le graphe de communication est connecté. De plus, le taux de convergence vers la formation est défini par la plus petite valeur propre positive du Laplacien du graphe.

Il est également possible d'étudier le problème de coordination dans le cadre des fonctions de Lyapounov {Ogren *et al.*, 2002}. L'hypothèse principale est que chaque robot a individuellement une fonction de Lyapounov. Des conditions suffisantes sont alors déduites pour qu'il existe toujours une fonction de contrôle de Lyapounov pour la formation de robots. Cette fonction est une somme pondérée des fonctions individuelles de chaque robot.

2.5.3 Les communications

On vient de le voir, la topologie des graphes de communication est très importante pour la stabilisation et/ou le contrôle d'une formation. Dans la plupart des situations, des communications sont nécessaires aux contrôleurs locaux pour obtenir des informations des robots voisins, voire des informations globales liées à la formation. Une majorité des études suppose une communication parfaite sans perte ni délai. De plus, les informations sont souvent considérées comme précises. Hors, dans le cas d'un système contrôlé par un réseau, les problèmes intrinsèques liés à ce réseau sont susceptibles d'affecter les performances et même de rendre instable le système.

Certains travaux se sont néanmoins portés sur l'analyse des performances de contrôleurs de formation dans le cadre de réseaux non idéaux {Seiler et Sengupta, 2001}. Dans {Liu *et al.*, 2001}, les effets des retards de communication sont étudiés dans le cadre de la stabilité de corde. Il est montré que les pertes et les retards peuvent causer des instabilités dans le système. Une méthode de synchronisation est alors proposée, de façon à améliorer la robustesse vis-à-vis de petits retards de communication.

La perte de communication pour une longue durée, voire de façon définitive, est un réel problème pour la formation, car il est alors nécessaire de pouvoir écarter sans dommage le robot défaillant. Il apparaît clairement que le système de communication est un système critique, notamment dans le cas des avions sans pilote.

2.5.4 Les stratégies de commande

On peut distinguer plusieurs stratégies de commande pour un groupe d'engins en formation, qu'ils soient terrestres, aériens ou spatiaux. Ces stratégies sont plus ou moins bien adaptées en fonction du milieu, du nombre d'engins et des critères de performances à atteindre.



Les approches comportementales et les champs de potentiels

Dans les applications liées à la formation, les approches comportementales et les champs de potentiels sont souvent liés. Dans une approche comportementale telle que le proposent Balch et Arkin {1998}, chaque robot dispose d'un ensemble de schémas de réactions élémentaires. Chacune de ces réactions produit un vecteur qui correspond à la réponse aux entrées des capteurs ou des flots de données. Les réactions élémentaires possibles peuvent couvrir l'évitement de collision ou d'obstacle, la recherche d'un but ou le maintien d'une formation. L'action qui va effectivement être appliquée est une moyenne pondérée des vecteurs de réactions élémentaires.

Le choix des poids associés à chaque réaction peut s'avérer très complexe, et fait appel le plus souvent à l'expertise du concepteur. Dans certains cas, il est néanmoins possible d'utiliser des algorithmes génétiques pour déterminer ces poids et obtenir un comportement approprié {Cao *et al.*, 2002}.

Les champs de potentiels sont naturellement adaptés au contrôle de robots holonomes, le déplacement se faisant dans la direction du vecteur de réaction globale. Dans le cas des robots non-holonomes, en particulier pour des avions, la réaction est décomposée en mouvements latéraux (correction du cap) et longitudinaux (correction de la vitesse et de l'altitude). Cette solution correspond à la méthode employée par les pilotes humains pour maintenir le vol en formation {Balch et Arkin, 1998}.

Les approches exploitant les champs de potentiels posent tout de même un certain nombre de problèmes. En particulier, leurs comportements ne sont pas déterministes et les cas de blocage par des « puits de potentiels » sont fréquents. Il faut donc les utiliser avec précaution pour ne pas mettre en péril la sécurité de la formation.

Les approches leader-suiveur

Une autre approche utilise le principe de leader-suiveur, particulièrement adapté dans les cas où la formation ne suit pas de trajectoire particulière ou si seulement une partie des engins a la connaissance de cette trajectoire. On distingue deux types de contrôleurs pour le maintien d'une formation de plusieurs engins :

- Le premier est du type $l - \psi$. L'objectif est de maintenir une distance l et un angle relatif entre le leader et son suiveur comme le montre la figure 2.9.
- Le second est le type $l - l$ et considère la distance relative entre trois robots mobiles, dont un seulement est le suiveur des deux autres. La figure 2.10 montre les conventions pour ce contrôleur.

Dans les deux cas, ces contrôleurs se basent sur des informations sensorielles locales, et une linéarisation du bouclage entrées/sorties permet la synthèse de contrôleurs capables de faire converger le système vers les valeurs désirées {Desai *et al.*, 1998}.

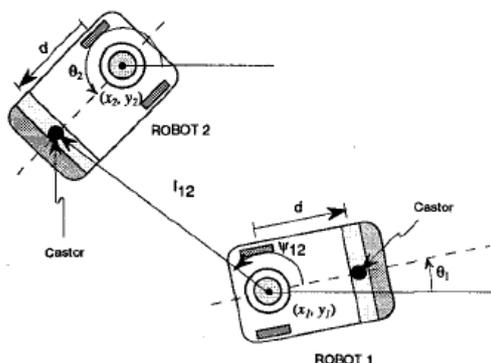


FIG. 2.9 – Notation pour le contrôleur $l-\psi$ {Desai *et al.*, 1998}.

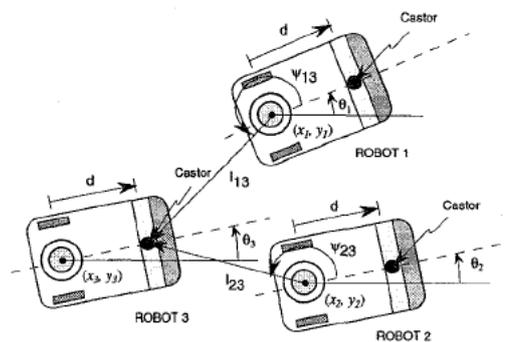


FIG. 2.10 – Notation pour le contrôleur $l-l$ {Desai *et al.*, 1998}.

Ce type d'approche peut être étendu à des formations plus importantes. Il faut pour cela définir un schéma de communication approprié et réaliser les études de stabilité adéquates.

On peut noter une expérimentation intéressante {Seanor *et al.*, 2006} avec trois drones en configuration de suivi de leader. Elle a été réalisée avec une approche d'inversion dynamique non-linéaire pour déterminer les consignes de vitesse, d'inclinaison et d'altitude.

Les coordonnées généralisées

Le principe des coordonnées généralisées proposé par Spry et Hedrick {2004} est de caractériser la position de la formation (P), son orientation (O) et sa forme (S) par rapport à un point de référence dans la formation. Les trajectoires des engins appartenant à la formation peuvent alors être spécifiées en fonction de ces coordonnées. Les lois de contrôle de la formation sont développées de façon à suivre des trajectoires tout en maintenant une certaine configuration dans la formation.

Les structures virtuelles

Le concept de structure virtuelle a été introduit par Tan et Lewis {1996}. Cette approche est très répandue dans les formations de satellites {Beard *et al.*, 2001}. Le principe est de faire en sorte qu'un groupe de robots se comporte comme un unique robot rigide. Pour cela, le contrôleur est synthétisé en trois étapes. Premièrement, la dynamique de la structure virtuelle est définie. Ensuite, le mouvement désiré de la structure virtuelle est transposé vers les mouvements désirés pour chacun des agents qui composent la structure. Enfin, des contrôleurs individuels sont dérivés pour le suivi de chaque agent. Le contrôle utilisant les fonctions de Lyapounov peut être utilisé dans le cadre des structures virtuelles {Ogren *et al.*, 2002}.



Le suivi de trajectoire

Cette catégorie regroupe les stratégies consistant à planifier les trajectoires de tous les drones sur un horizon temporel donné. Dans ce type d'approche, il s'agit le plus souvent de minimiser un critère pour trouver un chemin de consommation optimale, évitant les obstacles et en respectant des contraintes sur la configuration.

Schouwenaars *et al.* {2001} proposent une solution mêlant programmation linéaire et entière (MILP, Mixed Integer Linear Programming) permettant de prendre en compte des obstacles discrets. L'inconvénient majeur de cette approche est le temps de calcul très important si l'on souhaite planifier sur une grande distance. La solution proposée consiste à planifier sur un horizon temporel borné suffisamment court et de garantir que le véhicule, une fois au bout de sa portion de trajectoire, sera capable de s'arrêter, ou au moins de se mettre sur un circuit d'attente sûr {Schouwenaars *et al.*, 2002; Bellingham *et al.*, 2002}. Cette solution est donc particulièrement adaptée à des engins volant à basse vitesse dans des environnements encombrés. Cette application a été réalisée avec succès dans un scénario mettant en œuvre deux hélicoptères en milieu urbain devant réaliser des observations en maintenant un relais de communication avec le sol {Schouwenaars *et al.*, 2006}.

Raffard *et al.* {2004} proposent une méthode de résolution distribuée pour le problème d'optimisation, en prenant en compte la géométrie de la formation dans un environnement sans obstacle. La preuve est apportée que l'optimalité est conservée par rapport à un calcul centralisé. Ceci permet donc une répartition de la charge de calcul, qui reste malgré tout très importante. De plus, cette méthode demande d'échanger une grande quantité d'informations pour obtenir la convergence de l'algorithme.

Une approche originale est proposée par Lian et Murray {2002}. Elle consiste à générer des trajectoires à base de splines dont les coefficients ont été calculés de façon à garantir que la dynamique des engins sera respectée. L'avantage de cette méthode est que la génération de trajectoires est très rapide et peut se faire en ligne.

Les autres stratégies

On peut trouver d'autres stratégies de commande de formation faisant appel au contrôle non-linéaire, à la logique floue, aux algorithmes génétiques ou à l'apprentissage par renforcement. Certaines de ces méthodes peuvent venir en complément de solutions plus classiques. Par exemple, l'utilisation de modèles prédictifs permet de pallier l'imperfection des communications entre robots. On peut également signaler les *Boids* {Reynolds, 1987}, très utilisés dans l'animation par ordinateur, qui permettent de simuler les réactions d'un grand nombre d'individus en utilisant les méthodes comportementales sur des informations très locales. Les résultats sont très proches des réactions naturelles des oiseaux ou des bancs de poissons.

2.6 Bilan

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions générales sur les formations, en particulier dans le domaine aéronautique.

Il ressort de l'état de l'art dans ce domaine que les préoccupations sont essentiellement autour de l'automatique de vol et le contrôle de la formation. Le chapitre suivant est davantage orienté vers des aspects de niveau mission.



Chapitre 3

Missions pour formations de drones en environnement hostile

LE BUT de ce chapitre est de poser la problématique du vol en formation en environnement hostile. Nous nous attachons en particulier à présenter ce que peuvent être les missions confiées à une ou plusieurs équipes de drones, ainsi que les objectifs de la planification de tâches dans ce contexte. Nous détaillons également les différents éléments de l'environnement et leur modélisation, ce qui peut avoir des répercussions sur les hypothèses de résolution de notre problème. Enfin, un exemple de scénario est donné afin de mettre en avant le besoin d'une gestion entre la planification de mission et le contrôle de la formation.

3.1 Présentation des missions

3.1.1 Les différents types de mission

Dans un premier temps, nous allons lister les différents types de fonctions opérationnelles auxquelles peuvent être confrontées des équipes d'avions militaires au cours d'une mission. Certaines de ces missions sont potentiellement transposables au domaine civil, notamment en ce qui concerne la protection civile ou la surveillance du territoire.

La reconnaissance

C'est typiquement une opération d'observation d'un environnement pas ou peu connu. Généralement, c'est une phase préparatoire à des missions ultérieures, notamment d'attaque. Elle peut consister à faire des prises de vue d'objectifs potentiels et d'installations ennemies. Il peut aussi s'agir de cartographier une zone, ou de détecter les positions des radars et autres systèmes de défense antiaérienne.

Les missions de reconnaissance ont pendant longtemps été la spécialité d'avions hors normes pour leurs capacités à voler loin, vite, haut et en toute discrétion. Les plus célèbres de ces engins sont les avions espions américains U2 et SR-71 « Black Bird ». Ils sont aujourd'hui remplacés par les satellites militaires d'observation. Néanmoins, la prise d'informations locales directement sur le champ de bataille reste un atout majeur et l'apparition des mini- et micro-drones offre de nouvelles perspectives très prometteuses, mais pour de faibles champs d'action.

La possibilité de travailler en coordonnant plusieurs équipes est très intéressante. Cela permet notamment d'avoir des informations sur les systèmes radars plus rapidement et avec plus de précision par triangulation (voir § 3.4.3).

La suppression des menaces

La neutralisation, par destruction ou brouillage, des défenses antiaériennes (SEAD, Suppression of Enemy Air Defence) est une phase indispensable et à haut risque, qui précède généralement l'attaque proprement dite d'une cible. Pour ce type de mission, il faut disposer des moyens (brouillage, niveau de signature réduit, plan de vol, etc.) permettant de se placer au plus près des menaces.

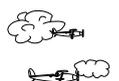
L'utilisation d'un groupe d'avions sans pilote volant en formation est tout à fait indiquée. Cela permet notamment de répartir la charge utile entre les drones et ainsi de répartir les risques. La perte d'un avion ne remet pas en cause le reste de la mission si le groupe dispose encore des ressources suffisantes. De plus, il est possible de séparer localement les équipes pour mener une attaque avec un nombre restreint d'appareils en gardant le reste de la flotte dans une zone sûre.

Sousa *et al.* {2004} proposent une approche d'élimination des menaces par vagues d'attaques successives de façon à maintenir le niveau de risque de la mission en dessous d'un certain seuil.

Cette phase de la mission, en fonction de la configuration des menaces et du terrain, peut se concentrer sur l'ouverture d'une brèche, sorte de corridor de sécurité, qui permettra à d'autres équipes d'atteindre des objectifs situés plus loin en territoire adverse.

Les attaques au sol

C'est la phase qui consiste à bombarder un objectif au sol. Les cibles sont ici des bâtiments, des bunkers, des installations industrielles stratégiques comme des usines ou des raffineries, mais



aussi des radars ou des sites de missiles. . .

Les attaques d'une cible par un groupe d'avions posent un certain nombre de problèmes.

Le premier est d'arriver sur le site de largage avec suffisamment de bombes pour détruire la cible. Il faut pour cela avoir évalué le niveau d'opposition et identifier les meilleures manières de passer au cours des phases de reconnaissance. Il faut aussi avoir dégagé, si nécessaire, un corridor pour le passage des avions de bombardement au cours des opérations de SEAD.

Ensuite, il faut coordonner l'attaque de façon à ce qu'elle se fasse le plus rapidement possible et si possible avec un seul passage. En effet, les protections autour des objectifs stratégiques sont souvent si importantes qu'elles ne peuvent être complètement détruites : il faut donc rester le moins de temps possible au dessus de la zone.

Enfin, il faut prévoir que les avions se rassemblent le plus rapidement possible après l'attaque afin de rejoindre leur base ou d'autres cibles. Il n'est pas question de laisser évoluer trop longtemps des avions en pleine zone hostile et une formation compacte aura plus de chances de survie que des avions éparpillés.

L'évaluation des dégâts

Afin de planifier la suite des opérations, il est important d'avoir des informations sur le niveau de réussite d'une attaque. Au moment de l'impact, des capteurs, généralement optiques, permettent d'avoir un premier retour pour savoir si l'arme a touché son but (BDI, Battle Damage Information).

Une deuxième phase de confirmation consiste à évaluer les dégâts qui ont réellement été infligés à une cible (BDA, Battle Damage Assessment). Cette opération, qui peut s'apparenter à une mission d'observation, ne peut pas toujours être menée immédiatement après une attaque. Les fumées et les débris créés par une attaque importante ne permettent pas toujours l'observation directe. La mission de BDA peut ainsi être menée par une autre équipe sur le chemin du retour par exemple, ou faire l'objet d'une nouvelle mission à part entière.

3.1.2 Les objectifs de mission

Comme on vient de le voir, l'objectif d'une mission est le plus souvent de prendre en compte un ou plusieurs objectifs (attaque, prise d'informations, interdiction, . . .).

Dans le cas de la planification multi-drones militaires, Sousa *et al.* {2004} proposent de classer les cibles en deux catégories. Les cibles primaires sont les objectifs de la mission, qui ne peut être considérée comme réussie que si toutes ces cibles sont détruites. Les cibles secondaires sont des menaces protégeant les cibles primaires. Le planificateur décide combien de cibles secondaires doivent être détruites, et dans quel ordre, pour pouvoir atteindre toutes les cibles primaires. Il

n'y a pas vraiment de notion de priorité puisque toutes les cibles primaires doivent faire partie du plan et que l'on cherche à traiter le minimum nécessaire de cibles secondaires.

Dans un contexte de type militaire, il est avantageux de faire une distinction entre objectifs primaires et secondaires. Il est ainsi plus facile de traiter différemment des cibles de natures très différentes par exemple. Cependant, pour conserver la généralité du problème et avoir une plus grande souplesse lors des replanifications, on souhaite faire intervenir la notion de priorité dans le groupe des objectifs primaires. Cela conduit à la définition suivante :

Les objectifs primaires. Ce sont les objectifs de la mission. Chaque objectif est défini avec une priorité qui peut éventuellement être remise en cause au cours de la mission. L'intérêt d'un plan et le succès de la mission sont évalués en fonction du nombre d'objectifs et de leurs priorités.

Les objectifs secondaires. Ce sont des objectifs annexes dont la présence peut nuire à la réussite de la mission. Ils ne sont donc traités que si leur suppression (attaque ou brouillage) permet d'atteindre un objectif primaire. En pratique, on ne connaît pas à l'avance toutes ces cibles : il faut donc en tenir compte lors de l'allocation des ressources au départ de la mission.

On peut noter que si les cibles secondaires sont toutes des menaces, radars ou systèmes de tir, les objectifs primaires peuvent, eux aussi, être des menaces.

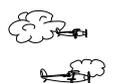
Pour chaque cible à détruire, il convient de spécifier le type et le nombre de bombes à utiliser. Cela conditionne le choix des équipes et des ressources à utiliser pour la mission.

3.1.3 Organisation d'un dispositif multi-robots

Dans la planification de missions multi-robots classiques, on cherche à produire un réseau de tâches ordonnées ou contenant des dépendances. Cela permet d'obtenir des synchronisations ou des exécutions de tâches en parallèle ou en coordination. De plus, l'allocation de tâches peut se faire de façon centralisée ou distribuée entre les robots. Gancet et Lacroix {2004} proposent une architecture pour le contrôle de plusieurs engins ayant des capacités de décisions hétérogènes. Cette capacité à intégrer des plans en provenance d'une station centrale, ou issus d'une négociation entre agents, peut se révéler très intéressante pour des missions en milieu hostile, où la communication avec le centre de commandement peut ne pas être garantie.

Modularité

Les missions multi-robots offrent des possibilités très intéressantes en terme de planification. Par rapport à des robots autonomes travaillant en coordination, la formation permet de considérer un groupe de plusieurs engins comme une seule entité à un niveau macroscopique, mais ayant des capacités de modularité bien supérieures. Si les engins ont individuellement des



capacités et des ressources très différentes, deux formations peuvent ainsi être envoyées vers deux tâches différentes, puis après s'être réunies, se séparer avec une nouvelle organisation des équipes pour accomplir de nouvelles tâches qui n'étaient peut être pas possibles initialement.

Réseau d'autorité

Du fait que les véhicules se déplacent en groupe avec des objectifs communs, les relations entre eux ne peuvent être totalement décrites avec un réseau de tâches. En effet, la formation étant considérée comme un tout, elle a besoin de désigner un interlocuteur pour échanger des informations avec l'extérieur. Ainsi on peut mettre en place en parallèle du réseau de tâches un réseau d'autorité. Son rôle est d'établir une hiérarchie de décisions. Chaque agent du système, en fonction de son niveau d'autorité, va être en charge de planifier ou de contrôler l'exécution d'une partie du plan global, d'assigner les tâches à des agents d'autorité inférieure ou de négocier avec des agents de même autorité. De plus, ce réseau doit être dynamique de façon à remplacer un agent incapable d'assurer son rôle (destruction, perte d'une partie de ses capacités, ...) ou lors de la création d'une nouvelle équipe.

Organisation

Dans cette étude, nous faisons l'hypothèse que le choix d'organisation du réseau d'autorité est le suivant :

Niveau mission. C'est le niveau d'autorité le plus élevé. Il définit les objectifs de la mission ainsi que l'allocation initiale des groupes. Les ordres de mission sont de haut niveau, c'est-à-dire qu'ils décrivent le type de mission, les cibles principales avec leurs priorités, les dépendances temporelles entre les tâches et les éventuels points de rencontre ou de synchronisation. La planification de mission est *a priori* centralisée et localisée au centre de commandement. C'est donc l'interface entre le système et l'humain. Cette interaction est cruciale et est l'un des objectifs du projet DARPA MICA (voir § 2.4.1).

Niveau tâche. Ce niveau reçoit les missions pour une ou plusieurs équipes d'engins. Son rôle est d'affiner les tâches correspondant à ces missions, notamment en produisant les points de passage pour les formations dont il a la charge, ainsi que les contraintes tactiques qu'elles doivent respecter (voir § 3.5). L'intérêt principal de ce découpage est de pouvoir manipuler les formations sans se soucier des problèmes « internes » à l'organisation de ces formations. Ce niveau, embarqué sur les engins en opération, doit faire des rapports de son activité au niveau mission le plus souvent possible. Or, ce n'est pas toujours possible à cause de la portée des communications ou des contraintes de silence radio. Pour rendre le système plus réactif et opportuniste sur le terrain, les échanges de tâches ou de ressources doivent pouvoir être directement menés entre plusieurs systèmes de ce niveau.

Niveau formation. Ce niveau a la charge de la gestion interne de la formation. Pour cela, il se base sur les consignes du niveau supérieur (points de passage, contraintes tactiques) et sur la connaissance de la situation tactique (présence et type des menaces). La présentation détaillée de ce système est l'objet des chapitres 4, 5 et 6.

Niveau engin. C'est la plus petite unité du système. Elle est indivisible. Elle correspond dans notre cas d'étude à un drone de combat (voir § 2.2.4). Chaque engin doit pouvoir assurer l'autorité de niveau tâche ou formation, ou être simplement un membre d'une équipe. En parallèle, il doit accomplir les tâches qui lui sont assignées (attaque, brouillage, observation, ...). La modélisation des avions et de leurs équipements est présentée section 3.4.

La figure 3.1 reprend cette organisation hiérarchique. Notre contribution se situe au niveau formation et en particulier la gestion autonome de la configuration de la formation. Un autre aspect important de notre travail est la gestion de l'activité de brouillage.

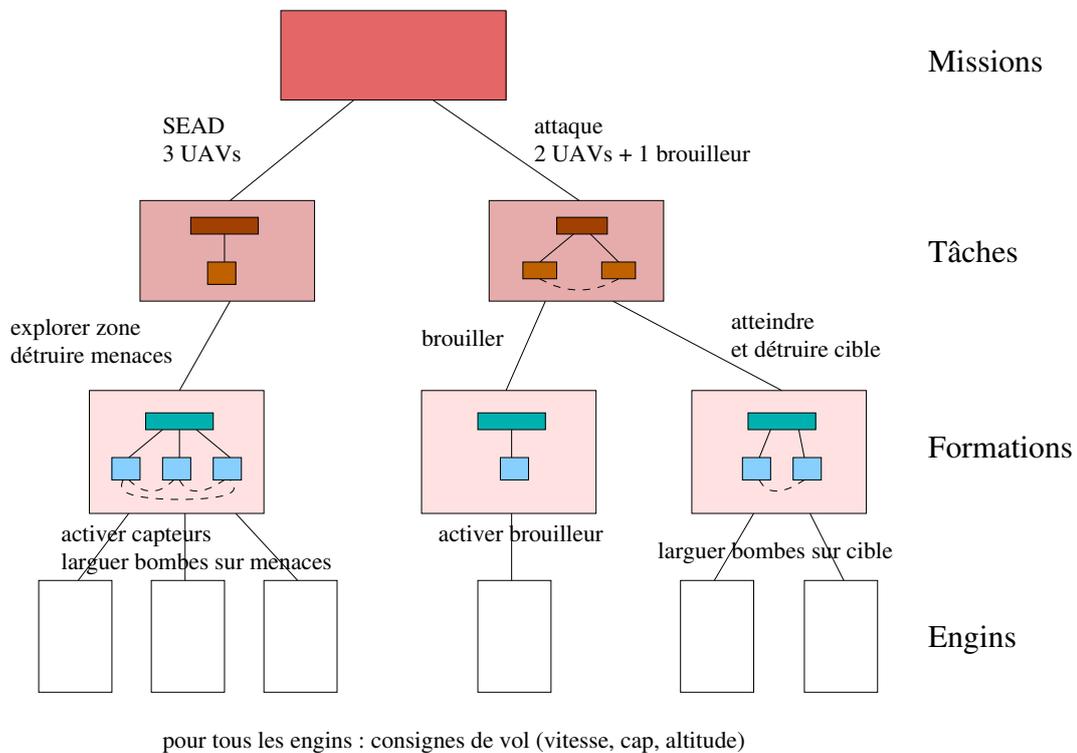
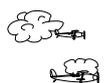


FIG. 3.1 – Organisation d'une architecture multi-formation.

3.2 Modélisation du terrain

Le terrain est modélisé par une carte d'élévation qui associe une altitude à un point géographique. La prise en compte du relief dans la phase de planification de mission est importante. Les drones de combat, contrairement aux drones MALE ou HALE (voir § 2.2.4), peuvent voler



à basse altitude. Ils peuvent ainsi bénéficier de la protection du relief vis-à-vis de certains radars. Il doit aussi être possible de définir des zones interdites de survol (NFZ, No Fly Zone).

Une des missions des drones peut également être la cartographie précise d'une zone afin de préparer une opération future.

Dans la suite de cette étude, nous considérons que le terrain est plan, ou du moins que l'on ne tient pas compte explicitement des avantages offerts par le relief. Il s'agit néanmoins d'une direction qui mérite d'être explorée.

Par ailleurs, les aspects liés aux problèmes météorologiques ne sont pas pris en compte, du moins en ce qui concerne la gestion interne de la formation.

3.3 Modélisation des menaces sol/air

On distingue deux types de menaces basées sur des systèmes électromagnétiques :

Radar de veille (EW, Early Warning). Un radar de veille est un système d'observation de l'espace aérien pour détecter d'éventuelles intrusions. Ces radars contrôlent un ou plusieurs sites de tir de missiles qui ne peuvent être situés à plus d'une certaine distance. Ils sont la plupart du temps activés et ont des portées assez grandes. On peut donc considérer que les positions des radars de veille sont assez bien connues avant le début de la mission.

Poursuite de tir (TF, Track & Fire). Les systèmes de tir sont constitués d'une conduite de tir (radar de guidage) et d'une rampe de missiles. Ils sont activés par les systèmes de veille au moment opportun, ce qui les rend difficiles à détecter avant le départ de la mission. Ces équipements sont de plus beaucoup plus légers et peuvent être déplacés beaucoup plus rapidement que les radars de veille.

Ces deux types de menaces, veille et tir, ont des portées variables, classées généralement en trois types : longue, moyenne et courte. De plus, la couverture des radars n'est pas parfaitement hémisphérique. Elle est limitée en altitude, et par un angle de site minimal et maximal, comme le montre la figure 3.2.

Il existe également des systèmes de missiles à base de guidage infrarouge. Contrairement aux systèmes électromagnétiques, ils ne peuvent pas être brouillés, mais peuvent néanmoins être leurrés. De plus, ce sont généralement des missiles à courte portée. Enfin, les canons anti-aériens permettent de tirer des projectiles à très courte portée. Ils ne peuvent être ni brouillés, ni leurrés.

Toutes les menaces sont en réseaux, c'est-à-dire qu'une information de détection acquise par un système peut être utilisée pour activer un autre mieux placé. De plus, une conduite de tir peut guider une rampe de missiles qui ne lui est pas co-localisée. La figure 3.3 montre un exemple d'organisation en réseau d'un système de protection d'une cible éventuelle.

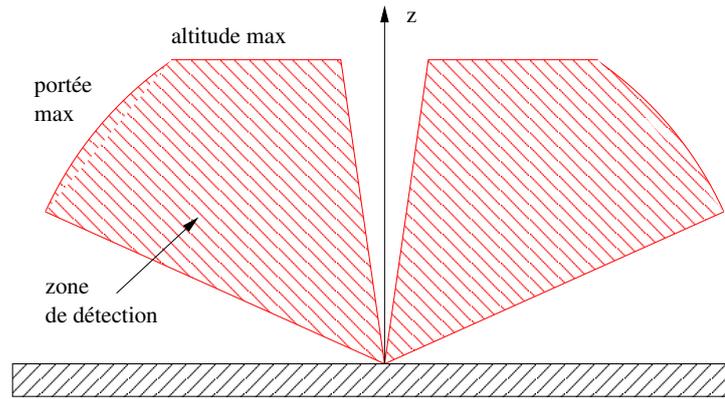


FIG. 3.2 – Zone de détection des radars de veille et de tirs.

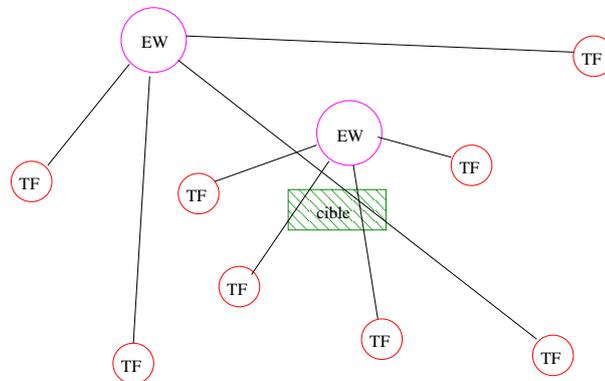
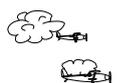


FIG. 3.3 – Système de protection autour d'une cible avec des radars de veille (EW) et de poursuite (TF).

Cette modélisation des menaces, certes un peu simplifiée, fait ressortir deux comportements bien distincts. Celui des radars de veille, plutôt prévisible, et celui des poursuites de tir, plutôt réactif. Cette différence a largement influencé certains choix de notre approche où l'on traite ces deux types de menaces par deux méthodes différentes et adaptées à la situation, tout en restant complémentaires l'une de l'autre.

3.4 Modélisation des drones et de leurs systèmes

Les modèles proposés ici sont ceux de l'environnement de simulation pour mise en situation d'algorithmes de résolution Artemis de *Dassault Aviation*, hérités de MISURE {Avalle et Patin, 2007}. Les valeurs numériques éventuellement présentées correspondent à des valeurs représentatives pour des engins volant comme des drones de combat. Elles sont données à titre indicatif, et doivent être adaptées en fonction du problème traité.



3.4.1 Les avions

Les avions représentés sont des drones de combat (UCAV) pouvant préfigurer un engin comme *nEUROn* (voir figure 2.5). La masse à vide se situe entre 3 et 4 tonnes. Les vitesses d'opération considérées sont entre mach 0,3 et 0,8. Ces engins ont également des contraintes dynamiques, mais seul le paramètre qui sera pris en compte par la suite est une limitation sur le facteur de charge. Chaque avion dispose de systèmes dont certains vont être développés plus loin. Les différentes fonctions sont :

MMS C'est le système de gestion de mission (Mission Management System). Il gère le contrôle d'exécution de la mission et éventuellement les tâches de replanification en ligne {Baltié *et al.*, 2007}.

FMS Système de gestion du vol (Flight Management System). Il contrôle l'avion et son vol, ce qui comprend les équipements de gestion de la consommation, de la puissance moteur, ainsi que le pilotage automatique et le contrôle du vol en formation.

LOC Ce système assure la localisation de la plate-forme en fusionnant les informations de plusieurs équipements, en particulier les positions GPS et les données de la centrale inertielle (IMU, Inertial Measurement Unit). La localisation à partir d'informations visuelles et de la connaissance ou non du terrain est une problématique à part entière dont l'étude débute à peine pour des engins volants du type des drones de combat.

COM Le système de communication permet de gérer plusieurs canaux qui seront présentés plus loin (voir § 3.4.2).

AUTO-PROT Les équipements d'auto-protection (voir § 3.4.3) permettent la détection des menaces, et gèrent les équipements de contre-mesures, permettant de brouiller des radars ou de leurrer des missiles.

SENSORS Ce système permet de gérer les différents capteurs disponibles sur la plate-forme, en pratique des caméras optiques (EO, Electro Optic), infrarouge (IR, Infra Red), et des radars à synthèse d'ouverture (SAR, Synthetic Aperture Radar).

TAC-SIT Ce système élabore une situation tactique à partir des différents capteurs internes ou externes (COM, AUTO-PROT, SENSORS). Les informations sont utilisées par le système de planification (MMS).

WEAPONS Ce système gère les armements et les équipements associés, par exemple un système de désignation laser (LD, Laser Designator) pour les missiles à guidage laser.

Certains de ces systèmes ont des interactions induites par l'utilisation d'appareils travaillant dans le spectre électromagnétique. Les systèmes concernés sont les communications, l'auto-protection et les capteurs. Ainsi, on peut définir des niveaux de priorité en fonction de la mission et des risques liés à l'environnement :

- si l'on souhaite utiliser pleinement les capteurs et les communications, le brouillage est impossible ;

- si l'on souhaite la meilleure protection, il est possible de brouiller : la portée des systèmes d'auto-protection est maximale, la portée des communications est fortement réduite et l'utilisation du SAR est impossible ;
- si l'on souhaite un compromis, par rapport au cas précédent, la portée de communication est augmentée et l'utilisation du SAR est possible, si le brouillage n'est pas actif.

3.4.2 Le système de communication

Le système de communication permet aux avions de communiquer entre eux et avec le centre de contrôle par trois canaux différents. Pour chacun de ces canaux, les messages peuvent être transmis en mode point à point (un seul destinataire) ou en mode diffusion (broadcast) où tous les agents écoutant le canal reçoivent le message.

IFDL C'est le canal de liaison interne à la formation (Intra Flight Data Link). Il permet la communication à courte portée, discrète, bidirectionnelle et à haut débit entre les avions d'un même groupe.

LBWDL C'est un canal de communication longue portée avec le centre de commande ou entre les groupes (Low Band Width Data Link). Cette liaison est bidirectionnelle et bas débit. Elle est utilisée pour transmettre les ordres de missions, faire les rapports d'exécution. . .

HBWDL C'est un canal uniquement des avions vers le centre de commande (High Band Width Data Link). Il est à haut débit et peut être utilisé pour avoir des images en temps réel de la zone survolée par les drones notamment.

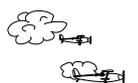
Afin d'assurer la sécurité du vol, le canal IFDL doit toujours être actif pour que les avions puissent échanger leurs positions. Les deux autres canaux longue portée peuvent rester silencieux pendant un certain temps si la mission exige une discrétion maximale.

3.4.3 Les systèmes d'auto-protection et équipements associés

Système de contre-mesures électroniques

Deux types de systèmes AECM (Active Electronic Counter Measure) existent :

Brouilleur Offensif (BO) Les systèmes offensifs permettent de rendre inopérant le radar de veille que l'on cherche à brouiller. Ils ne sont disponibles que sur un nombre restreint d'engins car cette fonction nécessite un équipement spécifique exigeant en terme de consommation et d'encombrement. Il s'agit donc d'un brouillage d'escorte, l'avion concerné ne pouvant pas prendre d'autres charges utiles. Dans la suite du document et bien qu'il s'agisse d'un abus, les termes « brouilleur offensif » et *BO* désignent aussi bien le système de brouillage que l'avion qui le porte. L'efficacité du *BO* sera considérée comme acquise pour tous les avions qui sont vus du radar brouillé à des distances supérieures à celle du



BO. Les angles possibles pour le brouillage sont de 360° en gisement² et de $+10^\circ$ à -30° en site³. De plus le *BO* doit être en intervisibilité avec le radar qu'il brouille. La Fig. 3.4 montre le domaine d'efficacité du *BO*.

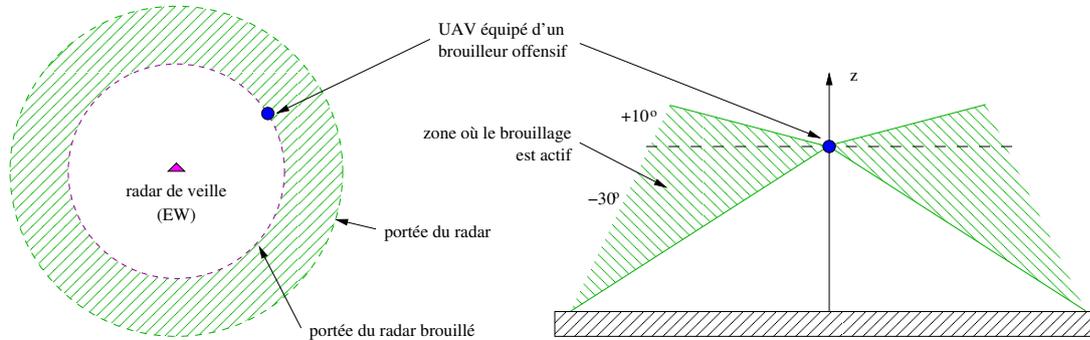


FIG. 3.4 – Effet d'un brouilleur offensif sur un radar de veille.

Brouilleur Défensif (*BD*) Les systèmes défensifs servent à se protéger des radars de tir. Plus simples et plus légers que les *BO*, ils sont disponibles sur toutes les plates-formes. Ils ne permettent pas de rendre inopérant le radar qui les pointe, mais ils les saturent dans leur direction, ce qui a pour effet de faire « décrocher » le radar de poursuite. On considère que tout avion situé dans le même pinceau radar à plus grande distance est ignoré. Les angles pour le brouillage défensif sont de 360° en gisement et de $\pm 45^\circ$ en site. Le pinceau radar est d'environ 3° . La figure 3.5 montre le domaine d'efficacité du *BD*.

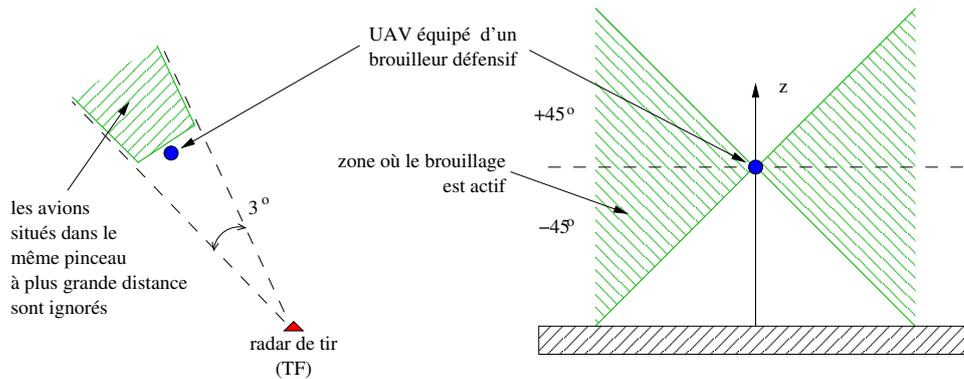


FIG. 3.5 – Effet d'un brouilleur défensif sur un radar de tir.

Ces deux systèmes, offensif et défensif, sont paramétrés par le nombre de menaces qu'ils sont capables de traiter en fonction des angles de gisement considérés. On considère 4 secteurs comme

²Le gisement est l'angle formé par l'axe longitudinal d'un mobile avec la direction d'un point extérieur (point fixe ou autre mobile).

³Le site, ou angle d'élévation, est l'angle entre le plan horizontal et la droite allant d'un appareil vers un objet visé à l'horizon.

indiqué figure 3.6 . Pour chaque secteur, le système offensif peut gérer 3 menaces et le système défensif une seule.

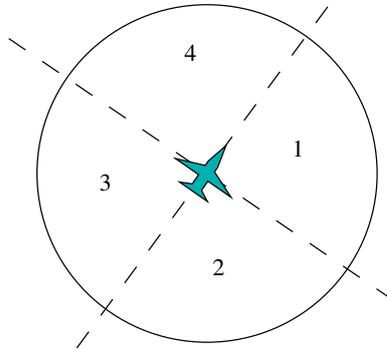


FIG. 3.6 – Les 4 secteurs en gisement pour le système d’auto-protection.

Les ouvertures en gisement et en site des brouilleurs peuvent avoir un impact important sur la trajectoire de la formation. Pour être efficace, il faudra donc respecter une certaine distance et une certaine hauteur par rapport aux radars, en particulier les radars de veille. De plus, l’inclinaison maximale, et donc le rayon de virage minimal, vont, eux aussi, être limités dans les phases de brouillage.

Détection et localisation des radars

Le système RWR (Radar Warning Receiver) permet la détection, la localisation et l’identification des radars rencontrés. Il permet notamment de distinguer les radars de veille des radars de tir. La précision de positionnement en gisement et en site est de 1° . De plus, la détection peut se faire à partir de deux fois la portée du radar. Comme le système ne peut fournir qu’une direction à un instant donné, la seule façon d’obtenir une position globale de la menace est de la voir sous différents angles pour faire une triangulation. Ceci ouvre de nombreuses perspectives du point de vue de la planification de mission. Si les différentes équipes ne sont pas contraintes au silence radio, elles peuvent s’échanger leurs informations pour avoir un positionnement plus rapide. Lors d’une mission de reconnaissance, cette contrainte peut être prise en compte dans la planification des points de passage des formations. Au sein même d’une formation, l’échange des données de perception peut conduire à une convergence plus rapide de l’estimée de la position.

Détection des missiles en approche

Le système MAW (Missile Approach Warner) permet de détecter les départs de missiles depuis une station au sol et d’en suivre la trajectoire de façon approximative. Cela permet en dernier recours de faire des manœuvres prédéfinies dites d’évasion. On prend alors le risque de rompre brutalement la formation.



Les leurres

Les avions militaires disposent depuis longtemps de systèmes de leurrage des missiles à guidage infrarouge (Flare, voir figure 3.7) ou électromagnétique (Chaff, voir figure 3.8). Leur but est que le missile prenne les leurres pour cible à la place de l'avion. Ce système est directement couplé avec le système de détection des missiles MAW.



FIG. 3.7 – Largage de leurres infrarouges (flare).



FIG. 3.8 – Leurres électromagnétiques (chaff) avec leurs douilles.

La surface équivalente radar (SER)

La SER (RCS, Radar Cross Section) est une description de la façon dont est réfléchi une onde électromagnétique incidente. Pour un objet donné, la SER est très dépendante de la longueur d'onde et de la direction du signal radio, ainsi que du matériau qui va renvoyer ce signal. L'utilisation de revêtements furtifs pour les avions militaires permet de réduire considérablement la SER. Prendre en compte ce paramètre dans le calcul des trajectoires peut se révéler bénéfique, mais rend la résolution du problème d'autant plus complexe {Bortoff, 2000}.

3.4.4 Les armements et équipements associés

Le système d'arme

Le système d'arme permet de gérer les armes embarquées à bord des avions. Pour des missions d'attaque au sol, ils disposent de deux types d'armements :

- des missiles propulsés avec guidage Laser ou GPS ;
- des bombes planantes à guidage Laser.

Chacune de ces armes ne peut être utilisée que dans une région du domaine de vol bien définie. C'est-à-dire qu'il faut respecter une certaine plage de vitesse, d'altitude et de facteur

de charge pour pouvoir tirer. De plus, il faut tenir compte d'un temps de mise en œuvre pour transmettre tous les paramètres avant de procéder au largage.

Le système de planification (MMS) doit également prendre en compte le domaine de tir de chaque arme. Ce domaine est l'ensemble des points accessibles par une arme guidée à partir de son point de largage. Un autre paramètre utile est l'efficacité de l'arme qui est d'autant plus grande que le missile arrive vite et avec un angle d'impact élevé. Cela a également pour effet d'améliorer la précision.

La portée des missiles propulsés va de 20 à 60 km environ pour des altitudes de largage de 2 000 à 35 000 pieds. Pour les bombes planantes, la portée va de 2 à 11 km pour la même plage d'altitude.

Tous ces paramètres réunis (type de missile, domaine de tir, efficacité, précision) permettent de déterminer une probabilité de destruction de la cible (PK, Probability of Kill). Cette valeur est très importante pour la phase de planification car elle va permettre de déterminer le nombre de bombes à envoyer pour espérer détruire complètement une cible, donc la quantité de ressources et le nombre d'engins à allouer à une formation. En cas de pertes imprévues, cela permet de savoir si la mission reste faisable, si elle doit être abandonnée ou redirigée vers d'autres objectifs.

La désignation de cible

L'équipement de désignation de cible par laser (LD, Laser Designator) permet de « marquer » une cible au profit d'un armement à guidage laser. Pour que le guidage soit effectif, le système doit être activé pendant toute la durée de vol de l'arme laser, ce qui peut entraîner une baisse de la furtivité de l'avion qui éclaire la cible. La distance d'utilisation et l'angle de divergence du faisceau laser influe directement sur la précision de l'arme.

3.5 Modélisation des points de passage et des contraintes tactiques

3.5.1 Les points de passage

Les points de passage sont l'ensemble des points par lesquels doit passer la formation. Ils permettent de définir une trajectoire de référence pour les avions. Ils sont définis par :

- un identifiant unique ;
- une position en coordonnées géoréférencées ;
- une vitesse nominale pour rejoindre le point de passage avec un intervalle de vitesses minimale et maximale ;
- une date de passage nominale avec un intervalle de temps ;
- un facteur de charge maximal à ne pas dépasser pendant le virage ;



- un type : *flyby*, *flyover* ou *flyover with route* (voir § 5.1) ;
- un cap de passage si nécessaire.

Le facteur de charge maximal pendant un virage est déterminé par la résistance de la structure elle-même, mais aussi par la présence ou non d'équipements (bombes, radars, ...) sous l'avion. Si une attaque doit être menée à un point de passage, le largage d'un missile ou d'une bombe ne peut se faire que sous un facteur de charge assez faible. Le facteur de charge maximal impacte le rayon de giration minimal d'un avion.

Le type caractérise la façon dont est abordé le point de passage :

flyby Le survol du point n'est pas obligatoire, on peut se permettre de passer à une certaine distance pour raccourcir la trajectoire. Ce type est surtout utile en phase de convoyage quand il n'y a pas de tâches particulières associées au point de passage.

flyover La trajectoire doit passer à la verticale du point de passage, mais le cap de passage est choisi au plus court par le système. Cela peut être utile pour réaliser une perception par exemple, si l'orientation de la prise de vue n'a pas d'importance.

flyover with route La trajectoire doit passer à la verticale du point de passage et le cap de passage est imposé.

3.5.2 Les contraintes internes

Les contraintes internes sont relatives à l'organisation interne de la formation. Ainsi les deux contraintes les plus importantes à définir sont :

- une distance minimale entre les avions pour assurer la sécurité du vol ;
- une distance maximale de façon à garantir un bon niveau de communication et une cohérence de la formation.

Il doit également être possible de spécifier explicitement une configuration géométrique pour la formation. De plus, chacun des emplacements, ou *slots*, ainsi définis n'est pas nécessairement affecté à un avion en particulier. Les contraintes associées à un *slot* peuvent être :

- un type d'engin ;
- un équipement ou une ressource que l'avion doit avoir ;
- une liste explicite des avions autorisés sur le *slot*.

Il faut donc être capable d'affecter les *slots* aux UAVs en respectant ces contraintes. Si aucune n'est définie, n'importe quel avion peut accéder au slot.

3.5.3 Les contraintes externes

Les contraintes externes sont issues du contexte. La principale contrainte est la présence d'une menace, que ce soit un radar de veille ou de poursuite (dans l'hypothèse où on ne tient

pas compte des menaces air ni des conditions météo, ce qui est le cas). Cependant le système de planification doit également pouvoir définir des priorités pour le traitement des menaces :

- priorité normale, le système de protection traite les menaces en fonction du niveau de risque qu'elles représentent ;
- priorité haute, la protection contre cette menace passe avant les autres, même si elle n'est pas la plus menaçante ;
- priorité basse, la menace est ignorée.

La trajectoire est définie par les points de passage. On souhaite également ajouter la largeur du corridor dans lequel les avions doivent voler. Cette valeur peut être déterminée par les couloirs aériens pour la gestion du trafic ou plus localement par la taille de la brèche qui a éventuellement été ouverte dans la défense adverse. En territoire ennemi, où il n'y a pas de couloirs aériens mais éventuellement des zones interdites (NFZ), le corridor n'a pas de sens réel. On va pourtant l'utiliser comme une grandeur caractéristique de l'empreinte au sol de la formation par exemple. En effet, cette valeur va servir à déterminer certains paramètres utiles à la gestion autonome de la configuration. Lorsque le risque est élevé et que l'on veut privilégier une formation rapprochée, on va choisir une petite valeur pour le corridor. On peut également ajouter des bornes d'étagement vertical, ainsi qu'une distance de sécurité par rapport au sol dans le cas où l'on vole en suivi de terrain.

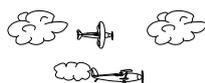
Les manœuvres particulières de séparation et de regroupement de formations peuvent être considérées comme des contraintes externes puisqu'elles font intervenir une formation externe à un moment donné. Lors de l'exécution d'une manœuvre de séparation, il est intéressant pour un système de planification de mission de ne définir qu'une répartition des ressources entre les futures formations, sans se préoccuper directement de l'affectation des UAVs.

3.6 Positionnement du problème : phase de convoyage d'une formation de drones de combat

La situation de la figure 3.9 présente un scénario de mission. Deux groupes de quatre UAVs entrent dans une zone protégée par des radars de veille, représentés par des cercles en pointillés. Les systèmes de tir ne sont pas connus au départ de la mission, mais sont détectés lors de l'exécution. Les groupes sont conduits vers la zone d'attaque en suivant des points de passage, puis sont évacués après regroupement. Au cours de la mission, les avions doivent respecter des distances de sécurité, des zones interdites et localement des corridors pour entrer ou sortir de la zone hostile.

Ce scénario fait apparaître les éléments produits par la planification de mission :

- des points de passage ;
- des menaces connues ;



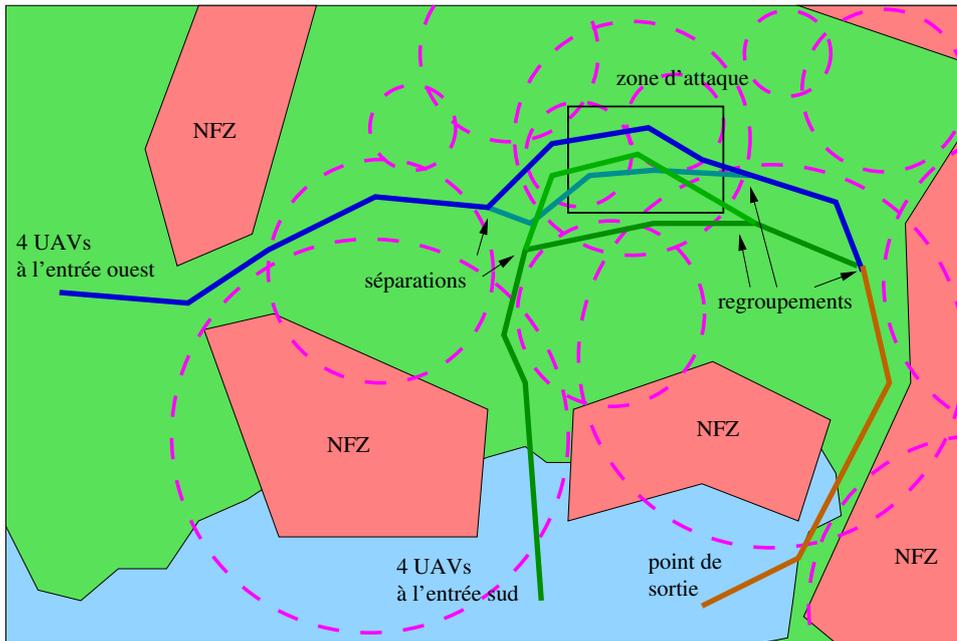


FIG. 3.9 – Exemple de scénario avec la situation tactique au début de la mission. Les cercles en pointillés correspondent aux radars de veille. Les trajectoires des groupes d’UAVs sont indiquées par des lignes de couleur.

- des contraintes tactiques ;

Il faut pouvoir assurer un certain nombre de fonctions pour que la mission soit réalisable par les avions, en utilisant au mieux les informations sur l’environnement. Ainsi, on souhaite :

- générer une trajectoire de référence pour la formation en se basant sur les points de passage ;
- produire une séquence de configuration pour la formation, en tenant compte des menaces et des contraintes ;
- s’assurer qu’il est toujours possible de passer d’une configuration à l’autre sans mettre en danger la formation, en planifiant, si nécessaire, des séquences intermédiaires de configuration ;
- produire des consignes de brouillage pour une protection efficace contre les menaces.

Notre objectif est de réaliser ces fonctions et de les organiser dans une couche dédiée à la gestion autonome de la formation, selon l’approche qui est présentée au chapitre suivant.

Chapitre 4

Une approche pour la planification et le contrôle d'une formation

CE CHAPITRE a pour objet de présenter les principes de fonctionnement d'un système de planification et de contrôle d'un groupe de drones volant en formation. L'objectif est de faire le lien entre les couches décisionnelles et le contrôle de formation en choisissant automatiquement la configuration de la formation. Une architecture pour supporter ce système est proposée.

4.1 Une couche intermédiaire pour la formation

4.1.1 Utilité d'une couche de formation

Nous avons vu dans le chapitre précédent une organisation des couches décisionnelles. Il existe d'autres organisations possibles mêlant les aspects fonctionnels et décisionnels {Volpe *et al.*, 2001; Muscettola *et al.*, 2002}, néanmoins, nous nous plaçons par hypothèse dans une structure hiérarchique, semblable à celle présentée dans la section 3.1.3 et que l'on peut revoir sur la figure 4.1. L'objectif est de produire des plans pour un ensemble de formations, ce qui se traduit par une liste ordonnée de points de passage, un ensemble de contraintes tactiques, de menaces et de tâches à accomplir. Si un tel plan est suffisant pour être exécuté directement dans le cas d'un robot mobile unique, dans le cas d'un groupe d'engins en formation, une étape intermédiaire est indispensable.

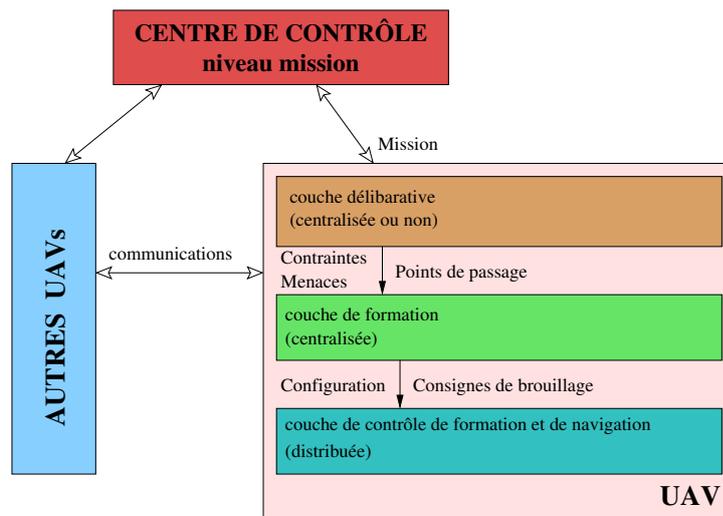


FIG. 4.1 – Positionnement de la couche intermédiaire de formation.

En effet, les systèmes de planification ne s'attachent pas au choix de la configuration. Lorsque ce problème est abordé dans le cadre du contrôle de formation, les avions sont placés selon des configurations géométriques pré-définies et rigides. Giulietti *et al.* {2000} met l'accent sur les liens de communications entre les engins et les éventuelles réorganisations se font selon des schémas prédéfinis de façon à avoir des formations pyramidales. Zelinski *et al.* {2003} proposent une plus grande variété de formations de base avec des transitions calculées hors ligne mais prenant en compte la dynamique des engins. Cette approche est intéressante mais reste limitée à un nombre fini de configurations et il serait très difficile de prendre en compte tous les cas de pertes d'engins, de présences de menaces, de séparations ou de regroupements de formations.

Dans l'idéal, il faudrait pouvoir choisir la configuration qui s'adapte le mieux à l'environnement, c'est-à-dire celle qui permet d'améliorer l'efficacité du groupe en lui permettant de consommer moins, de bénéficier d'un support mutuel lors des phases de brouillage, de pouvoir se réorganiser en passant d'une configuration à l'autre... Il faut pour cela s'affranchir des formes géométriques classiques et introduire le concept de « formation sans formation ».

4.1.2 Les fonctions réalisées par la couche de formation

Le choix de libérer les niveaux décisionnels des problèmes de gestion interne de la configuration implique que notre couche intermédiaire de formation puisse assurer les fonctionnalités suivantes :

- générer la trajectoire de référence de la formation ;
- choisir une configuration adaptée aux contraintes et à l'environnement ;
- planifier des trajectoires de reconfiguration pour passer en toute sécurité d'une configuration à une autre ;

- assurer le contrôle interne de la formation.

Le deuxième point est très peu abordé dans la littérature {Chen et Wang, 2005} et, à notre connaissance, aucune solution n'a été proposée à ce jour pour des applications militaires. Les approches comportementales basées sur l'utilisation de potentiels sont celles qui se rapprochent le plus de notre problématique, mais sont assez limitées car elles n'offrent que peu de garanties. De plus, l'utilisation de potentiels peut conduire à des blocages, à cause de symétries notamment. Cependant, elles peuvent être utilisées de façon centralisée ou non, et restent simples et efficaces dans des environnements dynamiques.

Le troisième point est plus riche en solutions, aussi bien avec les méthodes comportementales que les méthodes de planification de trajectoire. Les différentes options, ainsi que la solution que nous avons choisie, sont discutées à la section 6.2.

Le quatrième point consiste à implémenter l'une des stratégies de commande présentées § 2.5.4. On peut considérer que c'est une partie annexe du système que nous développons à la section 6.3.2.

4.1.3 Les éléments mis en œuvre dans la gestion de la configuration

La configuration est l'ensemble des relations géométriques entre les emplacements, ou *slots*, d'une formation. De plus, on souhaite que ces *slots* ne soient occupés que par des UAVs respectant des contraintes (voir § 3.5.2) associées à cet emplacement. Il en résulte que pour une configuration donnée, il peut exister plusieurs affectations possibles des avions sur les *slots*. Nous allons voir les éléments mis en œuvre dans la gestion autonome d'une configuration afin qu'elle s'adapte au mieux à l'environnement :

La trajectoire de la formation

La trajectoire de référence de la formation est générée à l'initialisation du système, à partir des points de passage définis lors de la phase de planification de la mission. Lors d'une replanification en ligne entraînant une modification de ces points, il faut de nouveau générer la trajectoire et mettre à jour tous les éléments qui en dépendent.

La *timeline*

La *timeline* est construite lors de la phase d'initialisation du système, à partir de la trajectoire et des contraintes. Il s'agit d'une représentation structurée de ces contraintes le long de la trajectoire. Les informations sont ainsi facilement accessibles par les autres composants du système. La *timeline* doit être mise à jour lorsque la trajectoire ou la liste des contraintes sont modifiées.



L'allocation des brouilleurs offensifs

La connaissance initiale de la présence des radars de veille (*EW*) permet de planifier l'allocation des brouilleurs offensifs. On peut ainsi placer les *slots* associés aux *BO* de façon à garantir une bonne protection. De plus, il est possible d'anticiper leurs déplacements. Ce mode de fonctionnement est par la suite appelé *mode paramétrique*. L'allocation est réalisée lors de l'initialisation et peut être remise en cause par la modification de la trajectoire, l'ajout/suppression d'un radar de veille ou la modification des contraintes de priorité sur le traitement des menaces.

Le brouillage défensif

Les systèmes de tir (*TF*) sont détectés au cours de l'exécution de la mission. L'ajout, la suppression ou la modification d'informations sur ces menaces n'entraînent aucune mise à jour complexe. Les nouvelles données sont simplement utilisées au cycle d'exécution suivant. Le comportement du système vis-à-vis de ces menaces est purement réactif. Les *slots* qui ne sont pas en *mode paramétrique* sont soumis à un champs de potentiels conçu pour favoriser le support mutuel lorsque les avions utilisent leur système de brouillage défensif. Ce mode de fonctionnement est appelé *mode réactif*.

L'utilisation des champs de potentiels pose évidemment un certain nombre de problèmes. On ne peut pas les utiliser pour des manœuvres complexes ou des positionnements précis, ils ne concernent que des ajustements locaux. En particulier, ils ne sont pas utilisés pour atteindre un point particulier, source fréquente de blocage. De plus, il ne peut y avoir de réelles garanties de performance, notamment en terme de support mutuel. Le choix d'une méthode comportementale se justifie néanmoins par le besoin d'une réponse rapide du système aux menaces de tir en évitant si possible de passer par les trajectoires de reconfiguration. Le réglage de l'intensité des forces n'en reste pas moins important si l'on souhaite un comportement convenable du système.

Les trajectoires de reconfiguration

Ces trajectoires sont calculées lorsqu'il se produit d'importants changements dans la configuration. Elles permettent de passer en toute sécurité d'une configuration à une autre en planifiant une séquence de petits déplacements élémentaires. Ce mode, appelé *mode planifié* prend la main sur les deux autres de façon à assurer la reconfiguration en toute sécurité. Ces séquences peuvent être interrompues à tout moment si une configuration finale plus intéressante est spécifiée par le système.

Mise à jour de la formation

Enfin, la formation elle-même peut subir des modifications. C'est le cas lors de manœuvres de séparation ou de regroupement, mais aussi lors de la perte d'un engin. Pour un regroupement

ou une destruction, il n'y a pas d'action particulière à effectuer. Il suffit de changer la liste des avions présents dans la formation pour que cela soit pris en compte. Là aussi, il y a une exception si un ou plusieurs avions sont des brouilleurs offensifs. Il faut alors revoir les allocations en conséquence.

Les manœuvres de séparation sont plus délicates. Comme indiqué § 3.5, il est possible de spécifier une distribution des charges utiles entre les futures formations plutôt qu'une affectation des engins eux-mêmes. Pour que la séparation se passe sans problème et en respectant les contraintes, il faut tout d'abord déterminer une configuration séparant les futurs groupes, puis effectuer une reconfiguration pour placer les avions à la bonne position. Il est donc indispensable d'anticiper ces manœuvres pour être prêt à se séparer au point de passage désigné.

4.1.4 Mise en œuvre de la couche de formation

Le principe de fonctionnement de la couche de gestion de la configuration est synthétisé dans la figure 4.2 :

- dans un premier temps, la trajectoire qui doit être suivie par le centre de la formation est générée à partir des points de passages (voir § 5.1) ;
- ensuite le système est initialisé à partir de la trajectoire, des contraintes, des menaces (*EW*) et de la formation elle-même (voir § 5.2), ce qui produit la *timeline* et l'allocation de brouilleurs offensifs ;
- puis, à chaque pas, le processus étant appelé de façon périodique, la configuration est mise à jour en se basant sur l'allocation des *BO*, de l'intervalle courant dans la *timeline* et des menaces (*TF*).

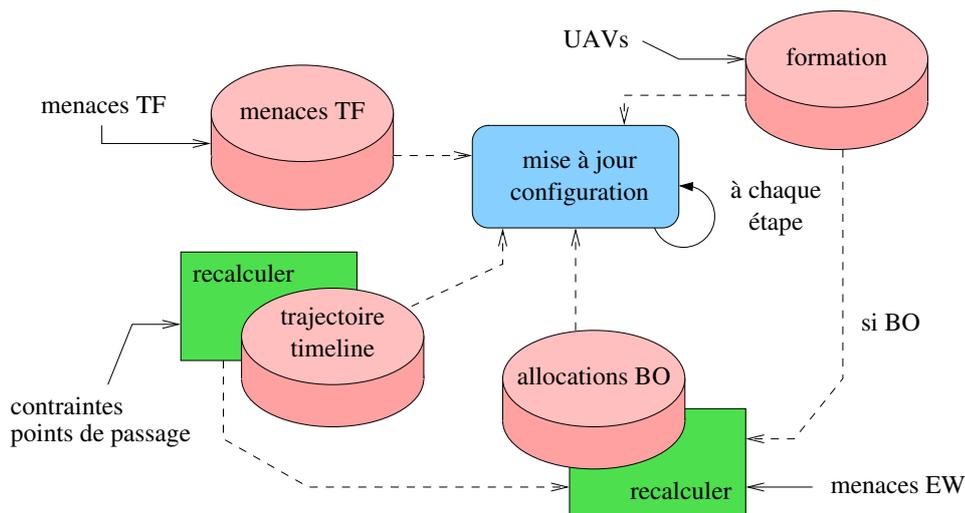


FIG. 4.2 – Processus de gestion de la configuration. Certains éléments nécessitent une nouvelle phase d'initialisation. Les autres sont simplement pris en compte à l'itération suivante.



La mise à jour de la configuration se fait avec une fréquence d'environ 1 Hz, ce qui correspond à peu près à la fréquence de fonctionnement des modules de navigation des avions.

Nous avons choisi d'implémenter ce système de façon centralisée. Notre méthode de résolution de la phase d'initialisation est difficilement distribuable et nécessite des temps de calcul très courts. Les algorithmes les plus lourds et qui peuvent être en partie distribués, nécessitent d'échanger des quantités importantes d'informations entre les avions. Cela peut se révéler problématique en milieu hostile. En cas de latence importante, le bénéfice du calcul distribué est perdu, voire devient un inconvénient. Cependant, certaines parties doivent pouvoir être distribuées sans augmenter l'utilisation de la bande passante de façon prohibitive. Cela pourrait contribuer à la robustesse ou à la réactivité du système, mais peut éventuellement poser des problèmes de sécurité de la formation si les informations ne sont pas bien partagées.

Mise à jour de la configuration

La mise à jour de la configuration se fait de façon périodique à partir des éléments présentés sur la figure 4.2. Le processus met également en avant les différents modes de déplacement des *slots*, c'est-à-dire *réactif*, *paramétrique* et *planifié*.

Ainsi, à chaque itération, la séquence de la figure 4.3 est réalisée. Si la formation est en mode planifié, les trajectoires de reconfiguration sont exécutées jusqu'à ce que la configuration finale soit atteinte ou que le mode planifié soit interrompu pour tester si une meilleure configuration finale peut être trouvée.

Si la formation n'est pas en mode planifié, la configuration est mise à jour en commençant par les *slots* en mode paramétrique. S'il n'y a pas de brouilleurs offensifs dans la formation ou s'il n'y a pas de radar de veille à traiter, cette étape ne fait rien. Sinon les *slots* sont placés selon la méthode présentée section 5.3.1.

Ensuite, les *slots* restants sont placés dans les espaces disponibles. Autant que possible, les *slots* sont placés à leur ancienne position afin d'éviter d'avoir à calculer des trajectoires de reconfiguration. Cela permet également d'assurer une continuité des déplacements en mode réactif. Si ce n'est pas possible, une recherche aléatoire est menée pour trouver une position libre qui respecte les contraintes.

Une fois que la configuration est totalement formée, les *slots* sont attribués aux avions en fonction des contraintes de positionnement des brouilleurs s'il y en a et des contraintes de répartition des charges utiles pour les manœuvres de séparation. L'algorithme est présenté à la section 6.1.

L'affectation des avions aux *slots* permet de déterminer si des trajectoires de reconfiguration sont nécessaires pour passer en toute sécurité de la configuration courante à la nouvelle. Ce choix se fait si le plus grand déplacement nécessaire pour passer dans la nouvelle configuration dépasse un certain seuil. Si tel est le cas, les trajectoires sont calculées (voir section 6.2) puis

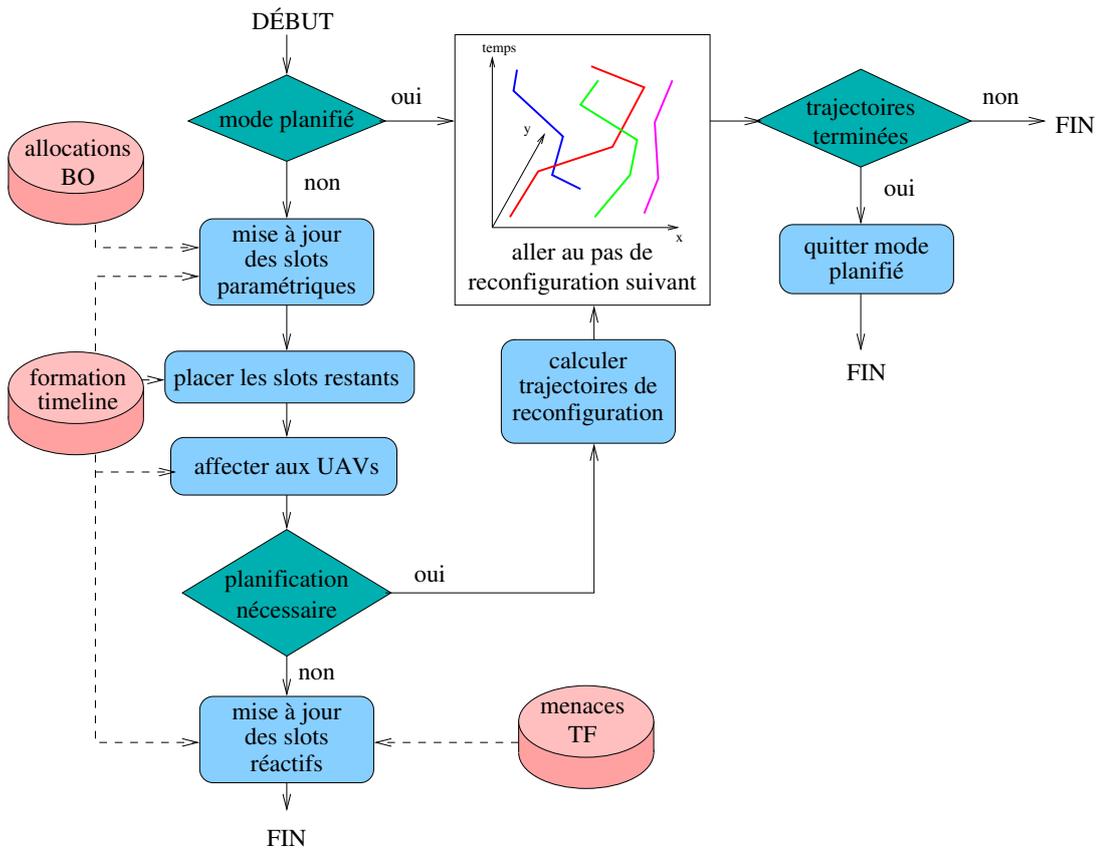


FIG. 4.3 – Processus de mise à jour de la configuration.

exécutées. Sinon, les *slots* en mode réactif sont soumis à un champ de potentiels qui détermine un déplacement élémentaire pour ces *slots*. Les forces de ce champ sont présentées à la section 5.3.3.

Sélection du leader

Comme la sélection de la configuration se fait de façon centralisée, il est légitime de se demander ce qu'il se passe lors de la perte du responsable de la formation, que l'on va désigner par le terme « leader ». Afin que le transfert d'autorité entre les avions se fasse de la manière la plus souple possible, chaque engin maintient à jour ses bases de données sur les menaces et les contraintes, la configuration courante, ainsi que la *timeline* et l'allocation des *BO*. Ainsi les seules informations perdues lors de la destruction du « leader » sont les trajectoires de reconfiguration et la configuration de destination courante associée. Or ces données sont de fait périmées puisque le nombre d'engins dans la configuration et les ressources ont changé suite à la perte de l'avion. Le nouveau responsable peut donc reprendre la tâche de son prédécesseur à partir de la nouvelle situation et sans perdre d'informations.

Le processus de sélection du nouveau responsable de la formation peut se faire soit de façon



statique, l'ordre étant donné *a priori* au départ, soit de façon dynamique, en tenant compte par exemple de la charge de calcul courante des avions. Pendant la phase de transition, chaque engin garde sa place dans la dernière configuration reçue de façon à assurer la sécurité du vol. Il est tout de même souhaitable d'avoir un processus rapide pour la sélection du nouveau responsable de façon à adapter au mieux et le plus vite possible la nouvelle formation à l'environnement.

4.2 Architecture

La bonne organisation d'un ensemble d'algorithmes est primordiale pour qu'ils soient pleinement efficaces. C'est le rôle de l'architecture de les supporter. La figure 4.4 reprend l'architecture globale présentée figure 3.1 en détaillant les interactions entre les engins.

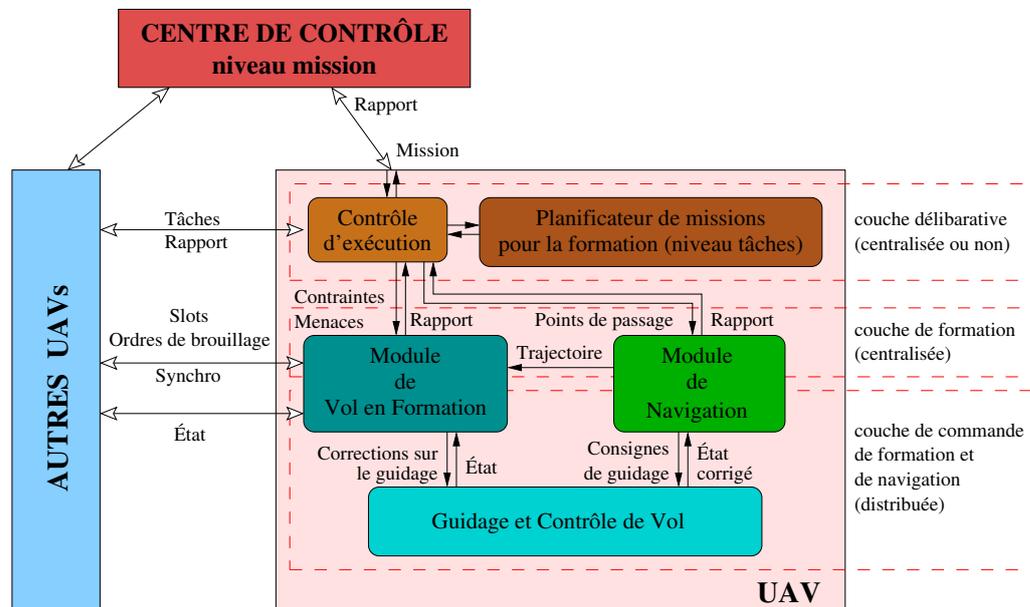


FIG. 4.4 – Architecture.

On voit, aux niveaux les plus hauts, les couches décisionnelles avec les planifications de missions et de formations. Le contrôle d'exécution a notamment la tâche de transmettre les informations (contraintes tactiques, points de passage...) qu'il reçoit du planificateur. La couche intermédiaire se situe dans le *module de formation* au même niveau que le *module de navigation*. Ce découpage est assez théorique et il est tout à fait envisageable d'avoir un module unique. Cela permet néanmoins de mettre en évidence que l'aspect navigation peut être totalement découplé des aspects de gestion de formation. Cette organisation nous paraît plus « élégante » mais n'entraîne pas de gain ou de perte de performance sur l'utilisation du système. Des considérations pratiques d'implémentation et de maintenance des couches fonctionnelles peuvent malgré tout conduire à l'une ou l'autre des solutions pour plus de simplicité.

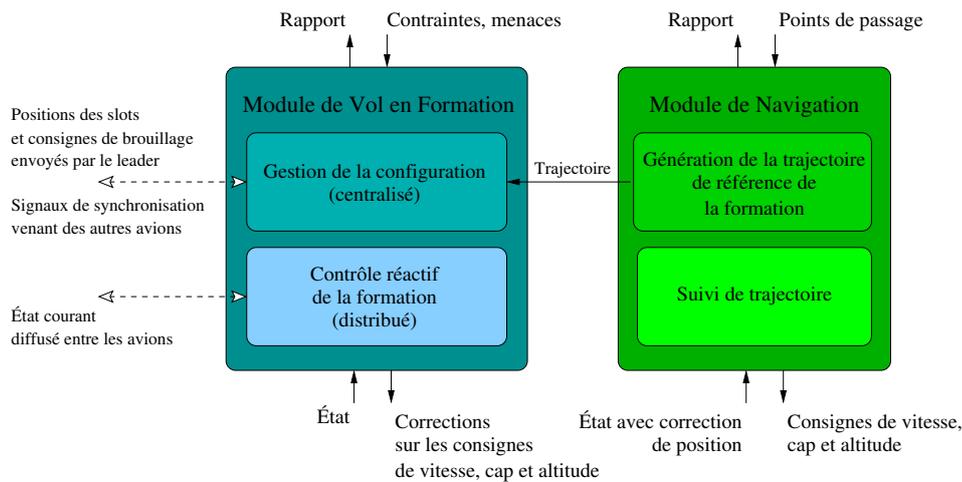


FIG. 4.5 – Couche de formation.

Quelle que soit l'option choisie, les services proposés par ces deux modules sont indispensables au bon fonctionnement de la formation. La figure 4.5 met en évidence le fonctionnement interne des modules de *navigation* et de *formation*. On voit en particulier la partie centralisée en charge de la gestion de la configuration et les parties distribuées de suivi de trajectoire et de contrôle de la formation. La trajectoire est générée par tous les avions à partir des mêmes points de passage. Ce n'est donc pas vraiment une tâche centralisée. La raison est que cela permet d'économiser de la bande passante en évitant de diffuser la trajectoire par le réseau. La trajectoire est celle du centre virtuel de la formation. Les avions suivent des trajectoires parallèles à celle-ci, décalées en fonction de leur position dans le repère local de la formation (coordonnées du *slot* par rapport au centre de la formation).

Enfin au plus bas niveau, on trouve le système de guidage et de contrôle des avions qui correspond au pilote automatique et aux lois de commandes. Les informations reçues par ce module sont des consignes :

- de vitesse ;
- d'altitude ;
- d'inclinaison (vitesse de changement de cap) ;

de la part du *module de navigation* et des corrections sur les consignes :

- de vitesse ;
- d'altitude ;
- d'inclinaison ;
- de décalage de position dans la formation ;

de la part du *module de formation*.



4.3 Bilan

Nous venons de voir les principes généraux de fonctionnement et d'organisation de notre système. Les deux chapitres suivants vont les développer en présentant les solutions algorithmiques mises en œuvre pour répondre aux différentes fonctionnalités.

Le chapitre 5 regroupe tous les aspects liés à la production d'une configuration pour la formation. Le chapitre 6 concerne la réalisation de cet objectif de configuration, c'est-à-dire l'affectation des UAVs aux *slots*, le calcul des reconfigurations et le contrôle de la formation.

Chapitre 5

Gestion autonome de la configuration

N OUS AVONS VU avec le principe de fonctionnement de la couche de formation au § 4.1.4 que le processus se décompose en une phase d'initialisation et une tâche périodique. Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter la génération de trajectoire de référence qui sert de base de travail lors de l'initialisation. Puis nous développerons cette dernière avec la construction de la *timeline* et l'allocation des brouilleurs offensifs. Ensuite, nous présenterons le placement des slots, qui correspond à l'activité périodique du système, avant de finir sur le cas particulier des manœuvres de séparation.

5.1 La génération de trajectoire

La trajectoire générée à partir des points de passage définis à la section 3.5 est une trajectoire de référence pour le centre de la formation. Les avions vont voler dans un corridor centré sur cette référence. Même s'il n'y a pas de couloir aérien défini, la largeur de ce corridor est utilisée comme valeur de commande du système. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir une trajectoire qui respecte exactement la dynamique des avions, mais elle doit malgré tout offrir des marges de manœuvre suffisantes.

La trajectoire se compose d'une succession de segments de droite et d'arcs de cercles. La

construction de la trajectoire se base essentiellement sur les courbes de Dubins {LaValle, 2006} pour les points de passage de type *flyOver* et *flyOverWithRoute*. Pour le type *flyBy*, le virage est ajouté une fois que le reste de la trajectoire est générée de façon à s'adapter au mieux.

On considère un objet mobile, défini par sa configuration $q = \{x, y, \theta\}$, devant se déplacer de $q_{initiale}$ à q_{finale} . Dubins {1957} a montré que pour un système simple décrit par :

$$x = \cos\theta \tag{5.1}$$

$$y = \sin\theta \tag{5.2}$$

$$\dot{\theta} = u \quad \text{avec } u \in [-u_{max}, u_{max}], \tag{5.3}$$

où u_{max} correspond au braquage maximal à vitesse constante, minimiser la longueur de la trajectoire revient à choisir parmi six combinaisons de trois déplacements élémentaires. Ces déplacements élémentaires sont :

- un virage à droite (D) à $u = u_{max}$;
- un virage à gauche (G) à $u = -u_{max}$;
- une ligne droite (L) à $u = 0$.

Le chemin optimal est alors l'une de ces six combinaisons (voir figure 5.1) :

$$\{DGD, GDG, DLD, DLG, GLG, GLD\} \tag{5.4}$$

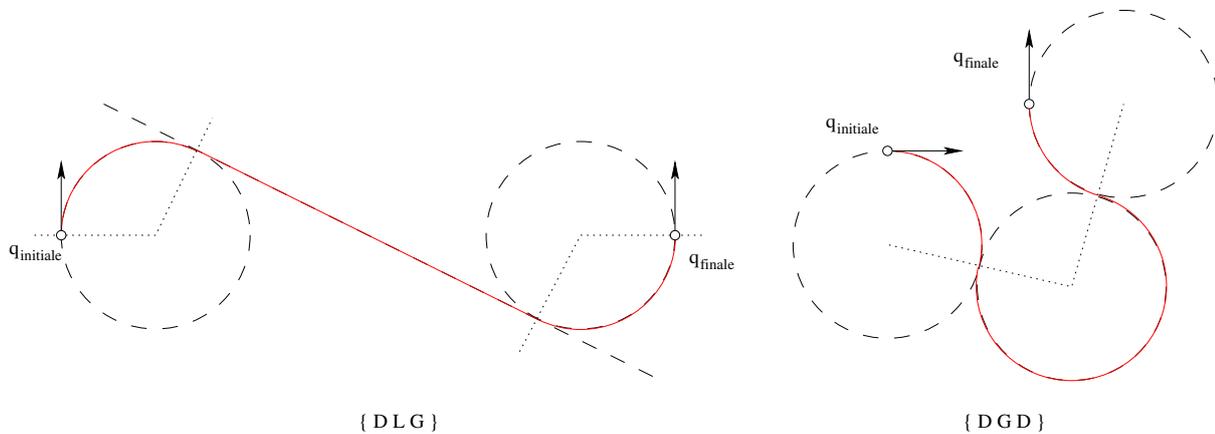


FIG. 5.1 – Deux exemples de trajectoires pour les combinaisons DLG et DGD .

Afin de garder un maximum de marge de manoeuvre pour les avions, sans pour autant faire de trop grands virages, le rayon de virage r est calculé de façon conservative et est donné par l'équation suivante :

$$r = \frac{V_{max}^2}{g\sqrt{n_{max}^2 - 1}} \tag{5.5}$$

où g est l'accélération de la gravité, V_{max} est la vitesse maximale et n_{max} le facteur de charge

maximal autorisé en virage. Cela signifie qu'un avion peut suivre le virage à la vitesse maximale sans dépasser la contrainte sur le facteur de charge. Dans le cas général où les avions volent à vitesse nominale, ils sont ainsi capables d'effectuer des manoeuvres, notamment des reconfigurations pendant les virages, même si cela reste plus aisé en ligne droite. La figure 5.2 montre un exemple de trajectoire avec les différents points de passage possible.

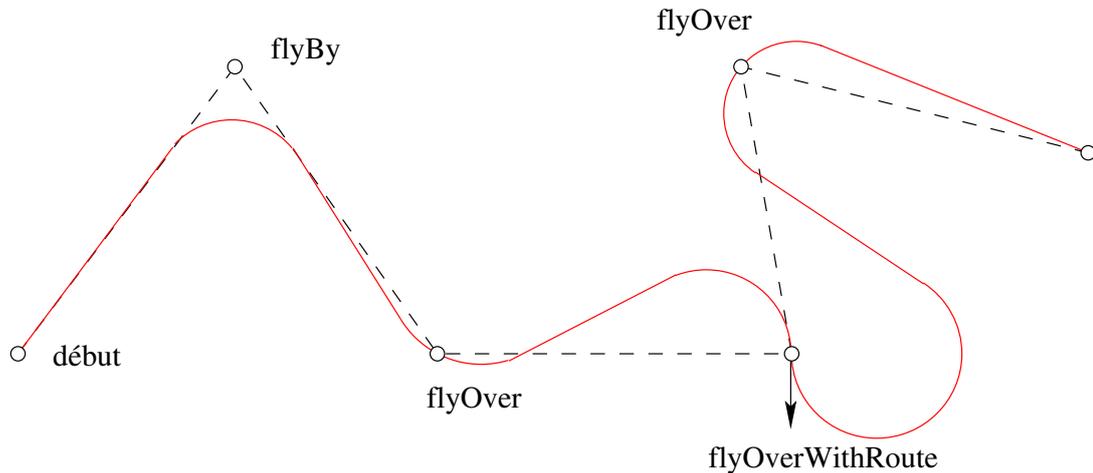


FIG. 5.2 – Trajectoire avec les trois différents types de point de passage.

5.2 La phase d'initialisation

5.2.1 La *timeline*

Les contraintes présentées à la section 3.5 sont définies entre deux points de passage. La *timeline* est une représentation structurée de ces contraintes le long de la trajectoire, ce qui permet d'accéder plus simplement aux informations utiles. Elle se compose d'intervalles (entre deux points de passage consécutifs) qui contiennent toutes les contraintes concernées, et pour chacune d'elles l'information la plus restrictive, comme le montre la figure 5.3. Les paramètres utilisés pour la sélection de la configuration et le calcul des trajectoires de reconfiguration sont pris dans l'intervalle courant de la *timeline*.

5.2.2 L'allocation des brouilleurs offensifs

Objectifs

L'objectif de l'allocation des brouilleurs offensifs est de définir à l'avance la meilleure place pour avoir un brouillage optimal des radars de veille. Il y a plusieurs façons d'utiliser les informations issues de ce système :



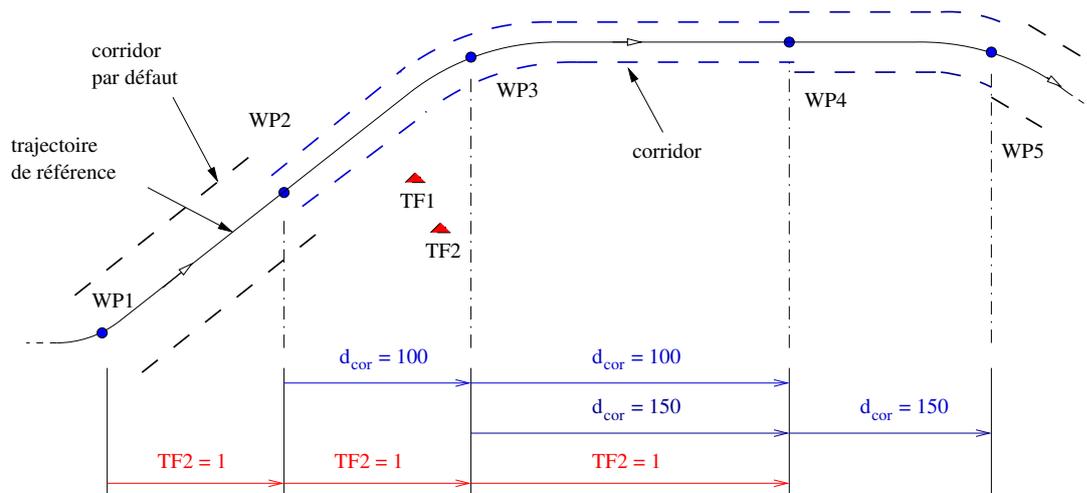


FIG. 5.3 – Exemple de *timeline* avec trois contraintes. Deux contraintes sur la largeur du corridor et une qui donne une priorité plus importante à la menace *TF2*.

- Lors de la phase de planification initiale, une requête adaptée permet de connaître le nombre de brouilleurs nécessaires pour avoir une qualité de protection donnée. Cette qualité est définie plus loin. Cette information permet soit d'allouer les ressources nécessaires, soit de revoir le taux de risque admissible par la formation. Ce processus peut également être mené lors d'une replanification en ligne.
- Au cours de l'exécution, lorsque le nombre de brouilleurs disponibles est fixé, l'information que l'on souhaite utiliser est la répartition des menaces à traiter entre les brouilleurs avec la meilleure qualité de brouillage possible. Cette répartition permet de définir la place des engins en mode paramétrique par rapport au centre de la formation.

Une allocation A , associée à un unique brouilleur, est définie comme un ensemble de menaces (EW) connexes, à portée de la formation et qui respecte les limitations sur les secteurs (voir §3.4.3) et l'ouverture maximale. L'ouverture de A est le plus grand angle formé par le centre de la formation et deux menaces de A . Ainsi, le point de référence utilisé se trouve sur la trajectoire alors que ce ne sera *a priori* pas le cas du BO . Cette simplification se justifie par le fait que cette phase sert à former des groupes et que toutes les informations utilisées pour le placement précis des brouilleurs ne sont pas encore disponibles. La figure 5.4 montre différents cas où une allocation est valide ou non. Par exemple, l'allocation (4,5) n'est ici pas connexe, car du point de vue du centre de la formation, la menace 6 est entre 4 et 5.

L'utilisation des allocations se base sur la notion de qualité du brouillage. Il convient donc de définir ce critère. La première constatation est que l'espace protégé par un brouilleur offensif dépend de l'ouverture. Ainsi que le montre la figure 5.5, une ouverture nulle offre un espace protégé maximal alors qu'une ouverture de 180° laisse un espace minimal pour le reste de la formation. Il n'est pas utile de considérer des ouvertures plus grandes. En effet, la distance

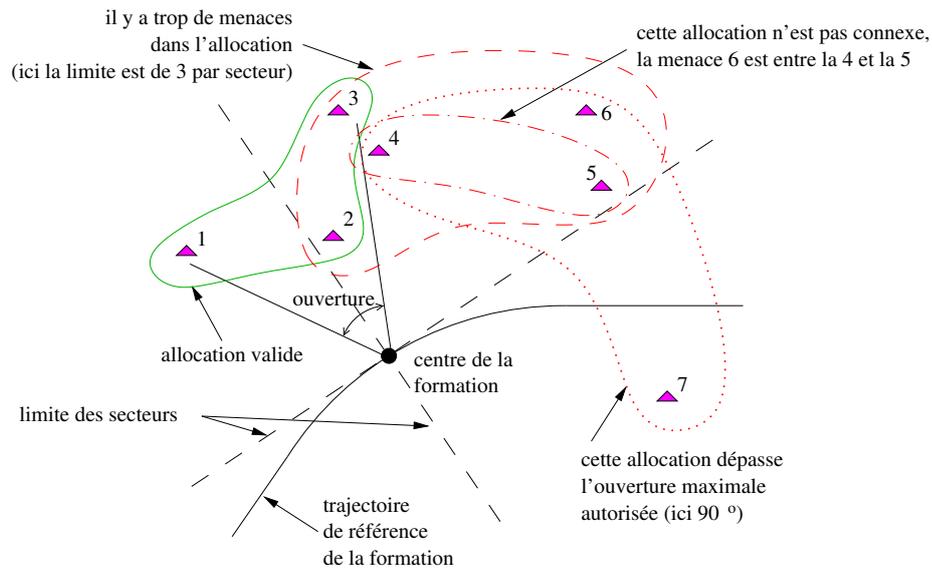


FIG. 5.4 – Exemples d’allocations valides (en vert) et non valides (en pointillés rouges) pour une ouverture maximale de 90° et un maximum de 3 menaces par secteur.

qui sépare le radar du brouilleur est grande par rapport à la taille du corridor, donc on peut approximer les arcs de cercles en rouge sur la figure 5.5 par des droites et dans ce cas l’espace libre en vert est nul pour 180°. De plus, un brouilleur sera d’autant plus efficace qu’il est capable de gérer un plus grand nombre de menaces en même temps. Le critère de coût C_A d’une allocation A est donc le rapport entre l’ouverture et le nombre de menaces dans A :

$$C_A = \frac{\text{ouverture de } A}{\text{nombre d'éléments dans } A} \quad (5.6)$$

On va donc chercher à minimiser C_A .

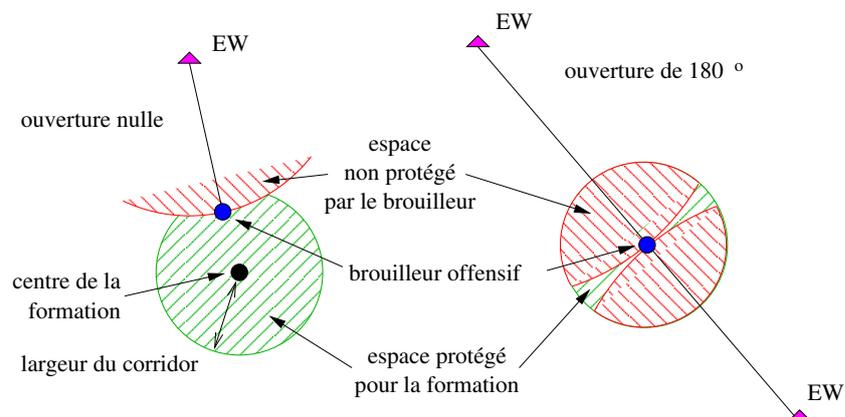


FIG. 5.5 – Exemple de zones protégées par un brouilleur offensif pour des ouvertures de 0° et 180°.



Algorithme d'allocation des brouilleurs offensifs

L'algorithme d'allocation des brouilleurs offensifs va déterminer pour chaque point de la trajectoire (discrétisée avec un pas régulier) les groupes de radars de veille qui seront affectés aux avions d'escorte.

Pour un ensemble d'allocations A_i , de coût C_{A_i} , le critère à minimiser est :

$$J = \alpha N + \sum_{i=1}^N C_{A_i} \quad (5.7)$$

où α est un coefficient de pondération et N le nombre d'allocations. Encore une fois, une allocation correspond à un brouilleur dans la formation, donc N est borné par le nombre de BO . Il est possible d'ajouter certaines contraintes en fonction du résultat que l'on recherche. Si l'ouverture maximale des allocations A_i est limitée, cela permet de déterminer le nombre de brouilleurs nécessaires pour une qualité de brouillage donnée. Si le nombre N est limité, cela permet d'avoir la meilleure qualité pour un nombre donné de BO .

La résolution de ce problème se base sur l'algorithme *Branch & Bound* {Land et Doig, 1960}. L'avantage de cette solution est qu'elle est complète (si une solution existe, elle sera trouvée) et optimale. Ses performances sont conditionnées par la taille du problème à étudier et la qualité de l'heuristique, c'est-à-dire du calcul de la borne qui doit donner une estimation minorante du coût total.

Pour le problème que l'on souhaite résoudre, le nombre de solutions possibles correspond au *nombre de Bell* B_n qui est le nombre de partitions d'un ensemble de cardinal n . Ce nombre est défini par la récurrence $B_{n+1} = \sum_{k=0}^n C_n^k B_k$ avec $B_0 = 1$. Si on prend la situation de la figure 5.4, il y a 7 menaces et donc 877 partitions possibles. Cependant, il faut tenir compte de plusieurs hypothèses :

- les menaces d'une allocation doivent être connexes ;
- leur nombre est limité par le nombre maximal de menaces par secteur de brouillage ;
- l'ouverture maximale est limitée (au moins à 180°).

Cela permet de réduire considérablement le nombre de solutions à explorer. De plus, en structurant convenablement les données d'entrée du problème, la recherche sera d'autant plus efficace.

Ainsi l'algorithme est initialisé avec une table contenant l'ensemble des solutions qui satisfont toutes les hypothèses. Pour ce faire, les menaces sont triées, en fonction de leur identifiant par exemple (l'ordre n'a pas d'importance du moment qu'il ne change pas). Ensuite, pour chacune des menaces, on forme une liste des menaces triées en fonction de l'angle orienté formé par la formation et les deux menaces. Par exemple, pour la menace 4 de la figure 5.4, la liste triée est la suivante :

Menace	1	2	3	4	6	5	7
Angle	-25°	-9°	-3°	0	$+72^\circ$	$+78^\circ$	$+120^\circ$

Il est alors très simple de former des groupes de menaces connexes dont l'ouverture ne dépasse pas une certaine valeur (ou à défaut 180°). Pour l'exemple de la menace 4, on va former les groupes contenant 4 en partant du singleton puis en augmentant la taille des groupes jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de former un groupe en respectant les contraintes, ou faute de menaces. Les groupes possibles pour 4 sont donc : (4) (3,4) (4,6) (2,3,4) (3,4,6) (4,6,5) (1,2,3,4). Or, il est souhaitable d'éviter les doublons dans la table. C'est l'intérêt d'étudier les menaces dans un ordre fixé. En se basant sur les identifiants par ordre croissant, pour la menace 4, tous les groupes où apparaissent les menaces avec des identifiants inférieurs sont à écarter car déjà testés. La table finale pour la situation de la figure 5.4 est :

Menace	Allocations associées
1	- (1) (1,2) (1,2,3) (1,2,3,4)
2	- (2) (2,3) (2,3,4)
3	- (3) (3,4) (3,4,6)
4	- (4) (4,6) (4,6,5)
5	- (5) (6,5) (5,7) (6,5,7)
6	- (6)
7	- (7)

Une fois la table des allocations initialisée, le processus de recherche, illustré par la figure 5.6, est exécuté. Le premier nœud d'un graphe est créé avec la table initiale, une solution vide et un coût nul. À chaque itération, on sélectionne l'allocation A avec le coût C_A le plus faible dans la table courante. Le coût d'un singleton est toujours égale à zéro puisque son ouverture est nulle. Or, cela correspond aussi à une utilisation très peu efficace des brouilleurs qui fait rapidement augmenter le nombre N dans l'équation 5.7. Pour éviter cela, on favorise les allocations dont le cardinal est supérieur à 1. Ainsi la meilleure allocation A est celle avec le plus petit coût C_A strictement positif, ou sinon le premier singleton disponible.

Soit l'allocation A associée à la menace T . Deux nœuds sont ajoutés dans le graphe à partir du nœud courant. Ils correspondent au choix « A fait partie de l'allocation globale » et au non choix « A ne fait pas partie de l'allocation globale ».

Dans le premier cas, A est ajouté à la solution et la table est mise à jour en supprimant toutes les allocations associées avec les menaces qui apparaissent dans A et toutes les allocations où T apparaît. Puis le coût J est recalculé pour cette solution partielle en suivant l'équation 5.7. La borne B est égale au coût, il n'est pas possible ici d'avoir une meilleure estimation du coût final.

Dans le second cas, A est simplement retiré de la table. Le coût J n'est pas changé et la borne B est égale à $J + 1$. Cela signifie que pour trouver une solution à partir de ce nœud, il faut au moins ajouter une allocation à la solution et donc augmenter N de 1.



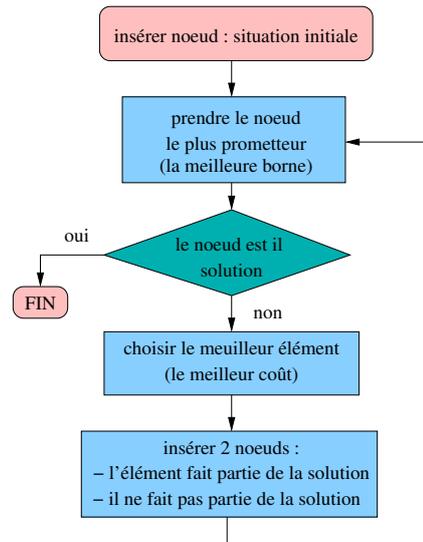


FIG. 5.6 – Algorithme *Branch & Bound*

L'étape suivante est de prendre dans le graphe le nœud avec la plus petite borne, ce qui correspond au nœud le plus prometteur. Si ce nœud est une solution du problème, c'est-à-dire si la solution contient toutes les menaces, c'est la solution optimale du problème.

Dans le cas où l'on souhaite limiter le nombre de brouilleurs, le processus est identique, à la différence qu'il faut couper les branches du graphe dont la solution dépasse, ou va dépasser, la taille limite.

Enfin, on peut noter que pour les tailles de problèmes que nous avons à traiter, le temps de calcul de l'algorithme ainsi conçu est très court. Il n'est pas nécessaire de pousser plus loin l'optimisation de l'algorithme ou l'analyse de ses performances.

5.3 Le placement des *slots*

Le placement des *slots* est le point central du système puisqu'il détermine la configuration de la formation. Le processus se déroule en deux étapes. La première consiste à placer les brouilleurs offensifs sur des *slots* dits « paramétriques » sur la base des allocations, puis le reste de la formation dans l'espace disponible. La seconde permet de faire évoluer de façon réactive les *slots* qui ne sont pas occupés par des brouilleurs offensifs, dans le cas où il n'est pas nécessaire de planifier une reconfiguration.

5.3.1 Placement paramétrique des brouilleurs offensifs

Le nombre de *slots* paramétriques correspond au nombre d'allocations et ne peut pas dépasser le nombre de brouilleurs dans la formation. Si on considère une allocation, le *slot* correspondant

se trouve sur la bissectrice de l'angle qui définit son ouverture. La distance d_p qui sépare le *slot* et le centre de la formation est déterminée automatiquement par la formule :

$$d_p = d_{cor} \left(1 - e^{-\frac{d_{min}}{d_{cor}}(n-1)} \right) \quad (5.8)$$

où d_{cor} est la largeur du corridor, n le nombre d'avions dans la formation et d_{min} la distance de sécurité minimum entre les avions. On a de façon évidente $d_p \in [0, d_{cor}[$. Plus d_p est grand, plus l'espace libre pour le reste de la formation est important. Cette distance augmente donc avec le nombre d'avions n . Dans le cas où il n'y a qu'un seul avion dans la formation, $d_p = 0$ et le brouilleur est placé directement au centre de la formation.

Lorsque d_{min} est proche de d_{cor} , cela signifie que l'espace va être très rapidement occupé par les avions. Ainsi plus le rapport d_{min}/d_{cor} est proche de 1 (en supposant que d_{min} reste inférieur à d_{cor}), plus le besoin d'espace protégé par le brouilleur va augmenter rapidement avec le nombre d'avions. Inversement, si ce rapport est proche de zéro, le *slot* sera placé près du centre puisqu'il n'est pas nécessaire d'être proche des limites du corridor pour libérer l'espace nécessaire aux autres avions. De plus, le temps nécessaire pour une reconfiguration est ainsi plus court.

Au cours de la progression de la formation le long de la trajectoire, les allocations évoluent au fur et à mesure des rencontres avec les menaces. Afin que les brouilleurs soient à leur place au bon moment, les *slots* paramétriques sont attribués en tenant compte d'un facteur d'anticipation. Si un brouilleur est disponible dans la formation, la sélection de la configuration en prévision des futures menaces et les manœuvres de reconfiguration commenceront suffisamment tôt pour que la formation soit protégée en arrivant à portée du radar. La distance d'anticipation tient compte du temps de vol prévu avant d'être à portée du radar et d'une estimation du temps de reconfiguration. Lorsque tous les brouilleurs sont déjà affectés, la possibilité de faire des transitions « douces » entre deux allocations a montré des résultats satisfaisants en simulation. Ainsi la position paramétrique du brouilleur est déterminée comme une pondération entre l'allocation courante et la suivante. Des précautions sont cependant à prendre pour sélectionner le brouilleur le plus proche afin d'éviter des croisements dangereux pour les avions.

Enfin, il faut tenir compte du cas où le placement paramétrique amène deux *slots* à une distance inférieure à la limite de sécurité d_{min} . Dans cette situation, la procédure consiste à augmenter la distance d_p entre le *slot* et le centre de la formation, jusqu'à résolution du conflit ou atteinte de la largeur du corridor d_{cor} . Si le bord du corridor est atteint, les slots s'écartent de façon symétrique en maintenant $d_p = d_{cor}$. Ces cas de conflits sont rares, notamment grâce à la contrainte de connexité sur les allocations de *BO* qui produit une ségrégation naturelle entre les groupes de menaces à brouiller.

La distance d_{cor} est très clairement utilisée ici comme paramètre de contrôle du système. Contrairement à la distance d_{min} qui doit toujours être précisée, la présence d'un corridor, notamment en zone hostile, est une donnée contingente.



5.3.2 Placement des *slots* restants

Une fois que tous les *slots* paramétriques ont été placés comme indiqué à la section 5.3.1, les autres *slots* sont choisis de façon à éviter d’avoir recours à une reconfiguration. Pour cela les *slots* sont laissés à leur position actuelle dans la configuration lorsque cela ne viole pas les contraintes (respect des distances de sécurité).

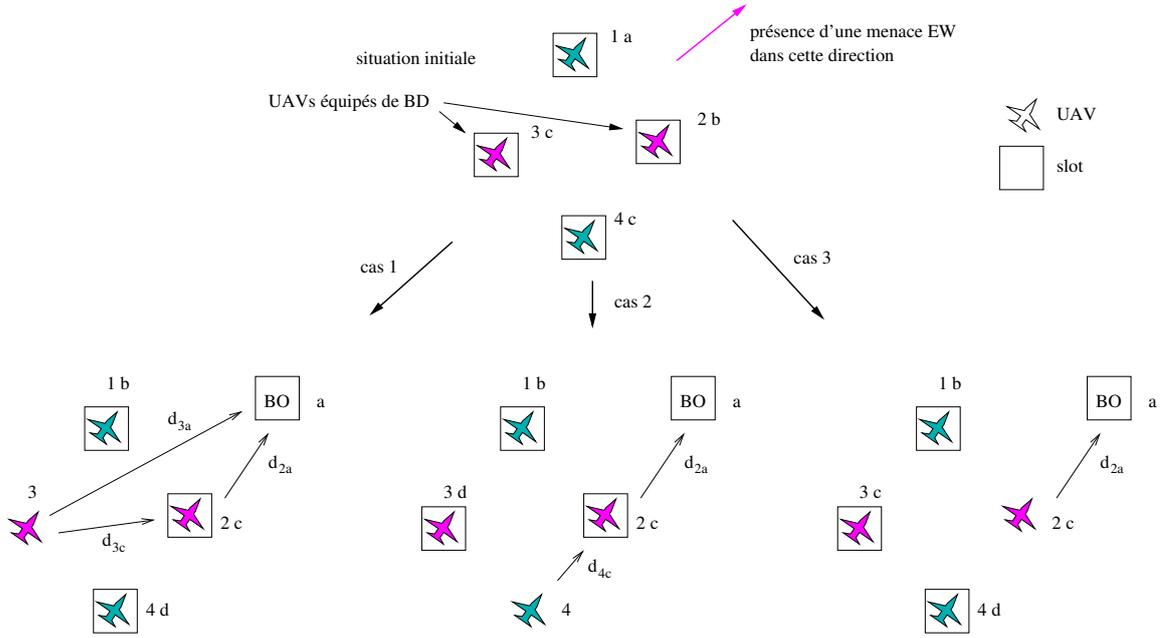
Nous avons envisagé plusieurs solutions pour chercher une place qui respecte les contraintes. La recherche de la position valide la plus proche par des méthodes géométriques exactes est relativement simple dans le plan, mais se révèle bien plus complexe en trois dimensions. Par ailleurs, les résultats obtenus par des recherches aléatoires fournissent des positions rapidement, sans perte visible de performances pour la formation. Cela tient notamment au fait que cette situation est peu fréquente en pratique et que l’espace libre respectant toutes les contraintes est relativement grand. La solution d’une recherche à partir du centre de la formation dans un volume de plus en plus grand a donc été retenue dans un premier temps, mais pourrait être améliorée vers une solution en temps borné.

L’étape de placement des *slots* non paramétriques introduit un biais dans l’algorithme d’affectation des UAVs aux *slots* présenté plus loin (§ 6.1), ce qui constitue un réel problème. Prenons la situation, illustrée par la figure 5.7, où une formation comportant deux brouilleurs va arriver à portée d’un radar de veille. Un *slot* paramétrique est donc placé en conséquence (*slot* a). Puis on place les autres *slots* en fonction des positions actuelles, sauf pour un, puisqu’il y a autant de *slots* que d’avions. Or le choix de ce dernier *slot* peut avoir des conséquences. S’il correspond au brouilleur le moins bien placé (UAV 3, cas 1), il sera malgré tout affecté au brouillage, entraînant une reconfiguration plus complexe. Cela s’explique par le fait que l’algorithme d’affectation cherche à minimiser la somme des distances à parcourir par les avions pour rejoindre leur futur *slot*, et que ces distances sont des estimations basées sur la distance euclidienne et non sur les distances réelles des trajectoires de reconfiguration ($d_{3a} \leq d_{3c} + d_{2a}$). Si l’avion orphelin de *slot* n’est pas un brouilleur, il y aura un mouvement plus intéressant (cas 2), mais toujours avec un déplacement inutile (UAV 4 vers *slot* c).

La procédure actuelle est de placer les *slots* paramétriques, puis les *slots* correspondant aux avions qui ne sont pas des brouilleurs. La formation est complétée, si nécessaire, par les *slots* correspondant aux avions brouilleurs, sans faire de choix *a priori*.

5.3.3 Mouvements réactifs

Une fois que la nouvelle configuration a été choisie et que les avions ont été affectés aux *slots*, on peut faire évoluer les *slots* non paramétriques pour qu’ils s’adaptent au mieux à l’environnement. Conformément au schéma de la figure 4.3, le mouvement réactif n’est calculé que si des trajectoires de reconfiguration ne sont pas nécessaires, c’est-à-dire si le plus grand déplacement entre la configuration courante et la nouvelle ne dépasse pas un certain seuil.


 FIG. 5.7 – Différents cas possibles pour placer des *slots* à partir de positions existantes.

Le mouvement réactif se base sur l'utilisation d'un champ de potentiels. Les forces qui le composent sont pour une part répulsives :

$$\mathbf{f}_{c_i} = \frac{-1}{(\|\mathbf{x}_i\| - d_{cor})^2} \frac{\mathbf{x}_i}{\|\mathbf{x}_i\|} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{f}_{u_i} = \sum_{\substack{j \in F \\ j \neq i}} \frac{1}{(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - d_{min})^2} \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} \quad (5.10)$$

$$\mathbf{f}_{t_i} = \sum_{t \in T} \frac{1}{(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_t\| - r_t)^2} \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_t}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_t\|} \quad (5.11)$$

où \mathbf{x}_i est la position (3D) d'un objet (UAV ou menace) i , d_{cor} est la largeur du corridor, d_{min} est la distance de sécurité entre les avions, r_t est la portée d'un radar de veille t brouillé, F est l'ensemble des avions dans la formation et T est l'ensemble des radars de veille brouillés.

L'équation (5.9) correspond à la répulsion des avions par rapport au bord du corridor, l'équation (5.10) correspond à la répulsion des avions entre eux et enfin l'équation (5.11) correspond à la répulsion des avions par rapport aux zones non protégées par les brouilleurs.

Le but premier de ce champ de potentiel est de s'adapter aux éléments réactifs de l'environnement, à savoir les poursuites de tir. Il faut donc mettre en place des forces attractives vers les zones protégées par les brouilleurs défensifs. Il s'agit en fait d'attirer les *slots* vers des « lignes de potentiels » pour les faire rentrer dans le cône de protection des brouilleurs défensifs (voir



figure 3.5). Ainsi nous avons l'ensemble d'équations :

$$\mathbf{m}_{ij} = \sum_{k \in S_j} \begin{cases} -e^{-\mathbf{v} \cdot \mathbf{w}} \mathbf{w}_\perp - (1 - e^{-\mathbf{v} \cdot \mathbf{w}}) \mathbf{w} & \text{si } \mathbf{v} \cdot \mathbf{w} > 0 \\ \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.12)$$

$$\text{avec} \begin{cases} \mathbf{w} = \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k}{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k\|} \\ \mathbf{v} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j + \alpha \cdot d_{min} \cdot \mathbf{w} \\ \mathbf{w}_\perp = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j + (\alpha \cdot d_{min} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{w}) \mathbf{w} \end{cases} \quad (5.13)$$

$$\mathbf{f}\mathbf{a}_i = \sum_{j \in R} \mathbf{m}_{ij} + \sum_{l \in P} (\mathbf{m}_{il} - \mathbf{m}_{li}) \quad (5.14)$$

où S_j est l'ensemble des poursuites de tir brouillées par l'UAV j (voir § 5.3.4), R et P sont respectivement l'ensemble des avions en mode réactif et celui des avions en mode paramétrique. Le paramètre α doit être supérieur à 1. Il permet d'éviter que la force $\mathbf{f}\mathbf{a}_i$ et les forces répulsives entre UAVs ne rentrent trop en compétition, ce qui diminue fortement l'efficacité de la force attractive. La valeur $\alpha = 1,5$ offre un bon compromis. Les conventions d'orientation sont présentées figure 5.8 avec les forces ainsi créées au niveau de la ligne d'attraction. Le décalage de d_{min} dans la direction de \mathbf{w} permet d'éviter que les forces $\mathbf{f}\mathbf{a}_i$ et $\mathbf{f}\mathbf{u}_i$ entrent trop fortement en compétition. De plus, la zone protégée par un brouilleur étant un cône, l'attraction peut être moins forte loin du brouilleur.

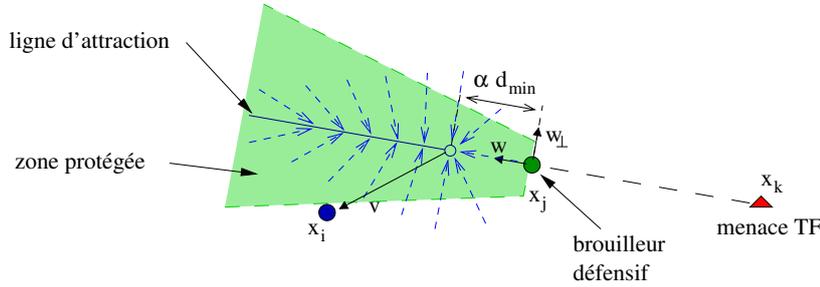


FIG. 5.8 – Force d'attraction pour les brouilleurs défensifs. La forme du champ de potentiels apparaît en pointillés bleus. Un UAV est attiré par une ligne de potentiel s'il est derrière le brouilleur.

Le second terme à droite de l'équation (5.14), qui concerne les *slots* paramétriques, correspond au fait que les brouilleurs offensifs qui sont sur ces *slots* peuvent également être des brouilleurs défensifs. Ils participent donc au champ de potentiels en attirant les avions non protégés. Dans le cas inverse où le *slot* paramétrique doit être protégé, il va attirer à lui un avion brouilleur en mode réactif. Cet effet vient du terme \mathbf{m}_{li} dans l'équation (5.14).

De plus, de façon à favoriser une structure compacte de la formation, une force d'attraction vers le centre de la formation est ajoutée :

$$\mathbf{f}\mathbf{s}_i = -(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{centre}) \quad (5.15)$$

où \mathbf{x}_{centre} est la position du centre de la formation.

Au final, la force appliquée à un *slot* i est la somme pondérée des équations (5.9), (5.10), (5.11), (5.14) et (5.15) :

$$\mathbf{f}_i = \alpha_1 \cdot \mathbf{f}_{c_i} + \alpha_2 \cdot \mathbf{f}_{u_i} + \alpha_3 \cdot \mathbf{f}_{t_i} + \alpha_4 \cdot \mathbf{f}_{a_i} + \alpha_5 \cdot \mathbf{f}_{s_i} \quad (5.16)$$

où les α_j sont des coefficients réels positifs, dont le réglage, comme pour tous les champs de potentiels, se révèle assez complexe. Seules l'expertise et l'expérimentation permettent d'obtenir un comportement convenable à partir de ces forces.

Le déplacement d'un avion en mode réactif ne doit pas être trop grand, afin d'éviter d'avoir à calculer une reconfiguration à l'étape suivante. De plus, de trop petits déplacements ne sont pas utiles et peuvent être « filtrés ». Le déplacement élémentaire \mathbf{d}_i du *slot* correspondant dans le champ de potentiels est donc :

$$\mathbf{d}_i = \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si } \|\mathbf{f}_i\| < \text{seuil min} \\ \mathbf{d}_{max} & \text{si } \|\mathbf{f}_i\| > \text{seuil max} \\ \mathbf{f}_i & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.17)$$

avec \mathbf{d}_{max} le déplacement maximal autorisé.

5.3.4 L'allocation des brouilleurs défensifs

Les ensembles S_j dans l'équation (5.12) correspondent à l'allocation des brouilleurs défensifs. L'algorithme d'allocation procède de façon systématique et naïve. Les menaces de type *TF* à portée de la formation sont ordonnées de la plus proche à la plus éloignée. Le *slot* le plus proche dont le brouilleur défensif est disponible, compte tenu des limites sur les secteurs (voir §3.4.3), est sélectionné comme brouilleur pour cette menace. Les avions qui se retrouvent dans le cône de protection du brouilleur sont mis de côté car ils bénéficient du support mutuel. Puis la séquence est répétée jusqu'à ce que tous les avions soient testés.

Il est bien évident que si l'environnement est très contraint (nombre important de menaces) et les capacités du système de brouillage limitées (une menace par secteur dans notre application), certains avions peuvent se retrouver sans protection. C'est le rôle du champ de potentiels, notamment de la force décrite par l'équation (5.14), de ramener le *slot* vers une zone sûre. Néanmoins, le système d'auto-protection doit pouvoir basculer le brouillage en priorité vers une cible plus menaçante, si un radar de tir a « accroché » un avion depuis un moment et qu'il risque de lancer un missile par exemple. Ce mécanisme peut se faire à l'aide d'une contrainte externe augmentant la priorité sur une menace (voir §3.5).

Dans la situation présentée figure 5.9, l'avion le plus exposé est celui du *slot* numéro 5. Il est affecté au brouillage de la menace et fait ainsi bénéficier les avions des *slots* 1, 3 et 4 de sa



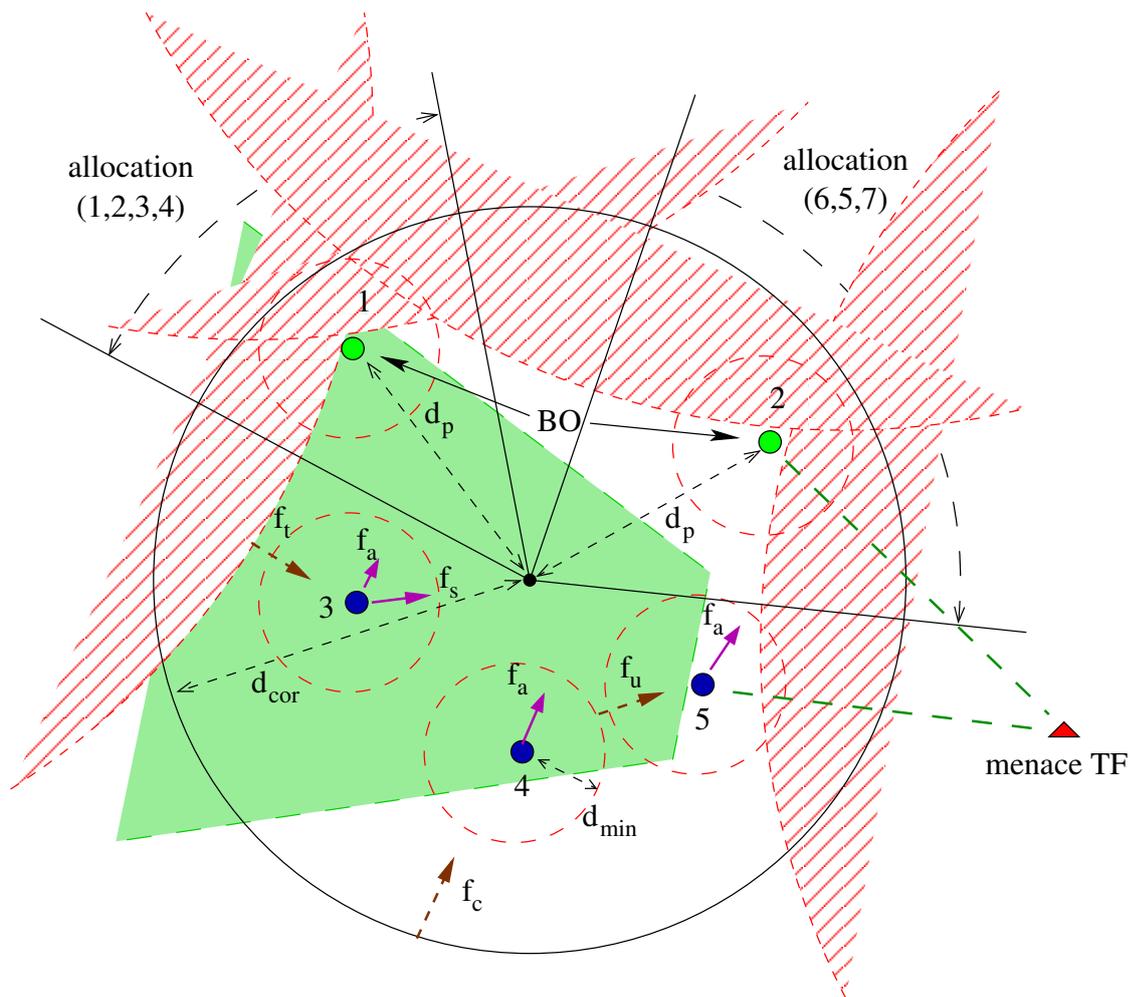


FIG. 5.9 – Exemple de configuration basée sur la situation de la figure 5.4. Les *slots* paramétriques sont en vert (1 et 2), les *slots* réactifs en bleu (3, 4 et 5), les zones non protégées par les *BO* en hachuré rouge et les zones protégées par les *BD* en vert plein. Les forces répulsives sont en pointillé marron et les forces attractives en magenta plein.

protection. Il reste donc l'avion du *slot* 2 qui doit assurer lui-même sa protection. Des exemples des forces attractives et répulsives sont présentées sur la figure. Les forces les plus intéressantes sont les forces f_a . On constate d'abord qu'elles ne concernent que les *slots* réactifs 3, 4 et 5. Ensuite les *slots* 3 et 4 sont bien attirés vers la ligne centrale de la zone protégée. Enfin le *slot* paramétrique 2 attire les *slots* réactifs, et notamment le *slot* 5 enfin de bénéficier de sa protection.

Pour revenir sur le brouillage offensif, la zone non protégée par le *slot* 1 est plus petite que celle du *slot* 2, bien que ceux-ci soient placés à la même distance du centre de la formation. Cela est dû au fait que l'ouverture de l'allocation (1,2,3,4) est plus petite que celle de l'allocation (6,5,7). Ceci confirme que ce paramètre d'ouverture est représentatif de la qualité du brouillage

en terme d'espace libéré pour le reste de la formation.

5.4 Les manœuvres de séparation

Les manœuvres de séparation sont une étape importante de l'évolution d'une formation. Elles servent de transition entre les étapes d'une mission et terminent une *timeline*. Pour apporter un véritable bénéfice à la planification, il faut pouvoir spécifier les futures formations en terme de charges utiles. Le choix de la répartition des engins est ainsi laissé à la couche de formation.

Le principe est de constituer au sein de la formation des petits groupes d'avions, avec l'utilisation des trajectoires de reconfiguration si nécessaire, de façon à pouvoir ensuite les séparer d'un seul bloc en plusieurs formations. Il est indispensable d'aider un peu le système en lui fournissant quelques informations complémentaires : en particulier le nombre d'avions dans chaque groupe (la somme doit être exactement égale au nombre total d'avions) et un placement relatif des groupes. Ce dernier point correspond aux centres des futures formations, exprimés dans le repère local de la formation courante. Pour que la séparation se passe sans conflit, il faut que les positions des futurs centres se fassent en accord avec les futures trajectoires des formations.

La configuration est déterminée en construisant un *diagramme de Voronoi* {Fortune, 1987}. Soit un espace euclidien E et S un ensemble fini de n éléments de E . Une cellule ou région de Voronoi est définie pour tout élément c de l'ensemble S comme l'ensemble des points de E plus proches de c que tout autre point de S , soit :

$$Vor_S(c) = \{x \in E / \forall p \in S \quad d(x, c) \leq d(x, p)\} \quad (5.18)$$

où $d(x, y)$ est la distance euclidienne entre deux éléments x et y de E .

Les centres des cellules du diagramme sont les centres des futures formations, E est délimité par la taille du corridor. Chaque cellule est remplie avec le nombre de *slots* correspondant au groupe. Cette dernière étape se fait en répartissant les *slots* de façon aléatoire dans les cellules. Ensuite l'algorithme d'affectation de *slot* (voir section 6.1) va attribuer les places disponibles aux avions en tenant compte des contraintes sur les répartitions de charges utiles.

Lors de ces manœuvres, tous les *slots* sont considérés comme étant en *mode paramétrique*, donc même une fois les reconfigurations éventuelles terminées, ils restent dans leurs positions et ne sont pas affectés par le champ de potentiels du mode réactif. La formation reste dans cet état jusqu'à la séparation effective, c'est-à-dire le transfert de l'autorité de niveau formation vers les nouveaux *leaders*, ou l'abandon de la séparation par une autorité supérieure.

Enfin, on peut signaler que dans le cas d'une manœuvre de regroupement, la problématique est beaucoup plus simple du point de vue de la couche de formation. Le plan de vol doit amener les formations à se rassembler côte à côte (cette étape délicate n'est pas gérée par la couche de formation). On ajoute alors à l'une des formations les UAVs des autres équipes pour en former



une nouvelle. Il faut prendre soin de recalculer les positions des slots par rapport au nouveau centre de la formation pour éviter de projeter les avions les uns sur les autres. Il ne reste alors qu'un *leader* qui prendra en compte les nouveaux avions lors de l'itération suivante.

5.5 Bilan

La gestion des slots permet de sélectionner une configuration adaptée aux contraintes de l'environnement. Cependant, pour qu'elle soit « utilisable », d'autres fonctions doivent être assurées.

L'objet du chapitre suivant est de présenter l'algorithme d'affectation de cette configuration aux avions de la formation, en respectant les contraintes de placement sur les *slots*, ainsi que les mécanismes permettant d'atteindre une configuration donnée en toute sécurité.

Chapitre 6

Planification et contrôle des déplacements au sein d'une formation

CE CHAPITRE présente les algorithmes, et leurs performances, qui interviennent une fois que la configuration de la formation a été déterminée. Ils correspondent à l'affectation des avions aux *slots* et, si nécessaire, à la planification de trajectoires de reconfiguration pour passer de la configuration courante à la suivante en toute sécurité. Les algorithmes de suivi de trajectoire et de contrôle distribué terminent ce chapitre.

6.1 L'affectation de *slots*

6.1.1 Objectifs

L'affectation de *slots* est l'étape qui se situe entre la sélection de la nouvelle configuration et, soit le calcul de trajectoires de reconfiguration, soit les mouvements réactifs (voir figure 4.3). L'objectif est d'affecter les UAVs aux *slots* de la nouvelle configuration en respectant les contraintes présentées à la section 3.5. Un *slot* peut être réservé à :

- un type d'engin ;
- un équipement particulier ;

- des avions désignés par leur identifiant.

Un second objectif de cette affectation est de minimiser les déplacements dans la formation. Cela permet d'économiser du carburant, d'éviter autant que possible d'avoir à calculer des trajectoires de reconfiguration qui prennent du temps et qui affaiblissent temporairement la formation. Le critère d'optimisation est donc de minimiser la somme totale des déplacements, en estimant les distances à parcourir par la distance euclidienne entre la position actuelle et le *slot* à rejoindre. Il s'agit bien sûr d'une estimation minorante des déplacements réels, mais qui est tout à fait réaliste lorsque les déplacements sont petits et n'impliquent pas d'évitement d'obstacles.

Il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire très classique faisant partie de la famille des problèmes d'affectation quadratique (QAP, Quadratic Assignment Problem). Sa complexité est NP-difficile {Garey et Johnson, 1979}, ce qui signifie qu'il n'existe pas d'algorithme capable de le résoudre en temps polynomial et que même une petite instance peut nécessiter une longue recherche. Le problème du voyageur de commerce (TSP, Travelling Salesman Problem) est un cas spécial de ce type de problème et est très proche de celui que l'on cherche à résoudre {Gutin et Punnen, 2006}.

L'algorithme de résolution retenu est de type *Branch & Bound* {Land et Doig, 1960}. Comme pour l'allocation des brouilleurs offensifs, le principe est de développer un graphe avec à chaque nœud deux branches : un choix et son opposé ; puis de calculer pour chacun une estimation minorante du coût final de la solution et de partir à chaque étape du nœud le plus prometteur.

6.1.2 Initialisation

L'algorithme est initialisé en remplissant un tableau contenant les distances entre les positions des *slots* courants et ceux de la nouvelle configuration. En reprenant la situation de la figure 5.7 dans le cas 2 (les distances sont sans unité et respectent l'échelle de la figure), le tableau initial est le suivant :

	slot a	slot b	slot c	slot d
UAV 1	21	0	15	16
UAV 2	17	15	0	20
UAV 3	35	16	20	0
UAV 4	33	22	15	15

De plus, si certains *slots* sont réservés à un équipement particulier, notamment les brouilleurs offensifs, il est possible de placer dans le tableau des coûts « infinis » aux endroits appropriés pour interdire l'accès de ces *slots* aux avions ne possédant pas cet équipement. Cependant, toutes les contraintes ne peuvent pas être prises en compte dès la phase d'initialisation. C'est le cas lors de manœuvres de séparation, lorsqu'une distribution de charges utiles est spécifiée pour des

groupes et non pour des *slots* en particulier. A partir du moment où une contrainte est attachée à un *slot*, elle peut être prise en compte dès l'initialisation. Dans l'exemple précédent, le *slot a* est réservé pour un des deux avions brouilleurs de la formation (2 et 3). Le tableau d'initialisation est finalement :

	slot a	slot b	slot c	slot d
UAV 1	∞	0	15	16
UAV 2	17	15	0	20
UAV 3	35	16	20	0
UAV 4	∞	22	15	15

Les valeurs ∞ garantissent que seuls les UAVs 2 et 3 peuvent être affectés au *slot a*. On peut également remarquer que si chaque avion se place sur le *slot* le plus proche de lui, il y a un conflit entre les UAVs 2 et 4 ou 3 et 4. L'avion 4 ne peut pas non plus prendre le *slot* restant (le *slot a*).

6.1.3 Itération

A chaque itération, on prend la meilleure valeur (la plus basse) dans le tableau correspondant au nœud courant. Notons d_{ij} cette valeur qui correspond à la distance entre l'UAV i et le *slot* j . A partir de là, deux cellules sont ajoutées dans le graphe.

La première correspond au choix « l'UAV i va sur le *slot* j ». Les cases de la ligne i et de la colonne j sont supprimées du tableau (ou remplacées par des valeurs ∞), ce qui signifie que l'avion est affecté et que le *slot* n'est plus disponible. Enfin, le coût est incrémenté de la valeur d_{ij} et la borne donnant une estimation du coût final est calculée pour ce nouveau tableau.

La seconde correspond au non choix « l'UAV i ne va pas sur le *slot* j ». La case ligne i et colonne j dans le tableau prend la valeur ∞ , signifiant que l'avion i ne peut plus aller sur le *slot* j . Le coût ne change pas et la borne est calculée pour le nouveau tableau.

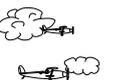
Pour chaque cellule du graphe la borne est calculée de la façon suivante :

$$m(i) = \min_{j \in [1, n]} d_{ij} \quad (6.1)$$

$$borne = cout + \sum_{i=1}^n \begin{cases} m(i) & \text{if } m(i) < \infty \\ 0 & \text{if } m(i) = \infty \end{cases} \quad (6.2)$$

où n est le nombre d'avions dans la formation (ou le nombre de lignes restantes dans le tableau). Ce calcul correspond au cas où les avions restants vont tous vers le *slot* le plus proche d'eux sans se préoccuper des conflits et est donc bien une estimation minorante du coût final.

Comme signalé plus haut, toutes les contraintes ne peuvent pas être prises en compte lors de l'initialisation. S'il existe une contrainte sur un groupe de *slots* et non un *slot* particulier,



la seule solution est de vérifier, pour chaque nœud qui ajoute un élément à la solution, que les contraintes sont toujours respectées. Si ce n'est pas le cas, la branche peut être retirée du graphe.

Une fois que les nouvelles cellules ont été ajoutées au graphe, on cherche parmi les cellules non explorées la plus prometteuse, c'est-à-dire celle dont la borne est la plus basse. Si cette cellule est une solution du problème, c'est la solution optimale, et elle respecte toutes les contraintes.

Notons également qu'il est possible de remplacer la recherche d'une solution optimale par une recherche de la première meilleure solution respectant les contraintes. Il suffit pour cela de supprimer le terme *cout* dans le calcul de la borne (équation 6.2) pour le choix « UAV i sur le slot j ».

La figure 6.1 présente le développement complet du graphe correspondant à notre exemple, figure 5.7, cas 2. La solution finale est bien (1b, 2a, 3d, 4c). On peut également constater que des branches ont été abandonnées car elles conduisaient à une situation sans solution.

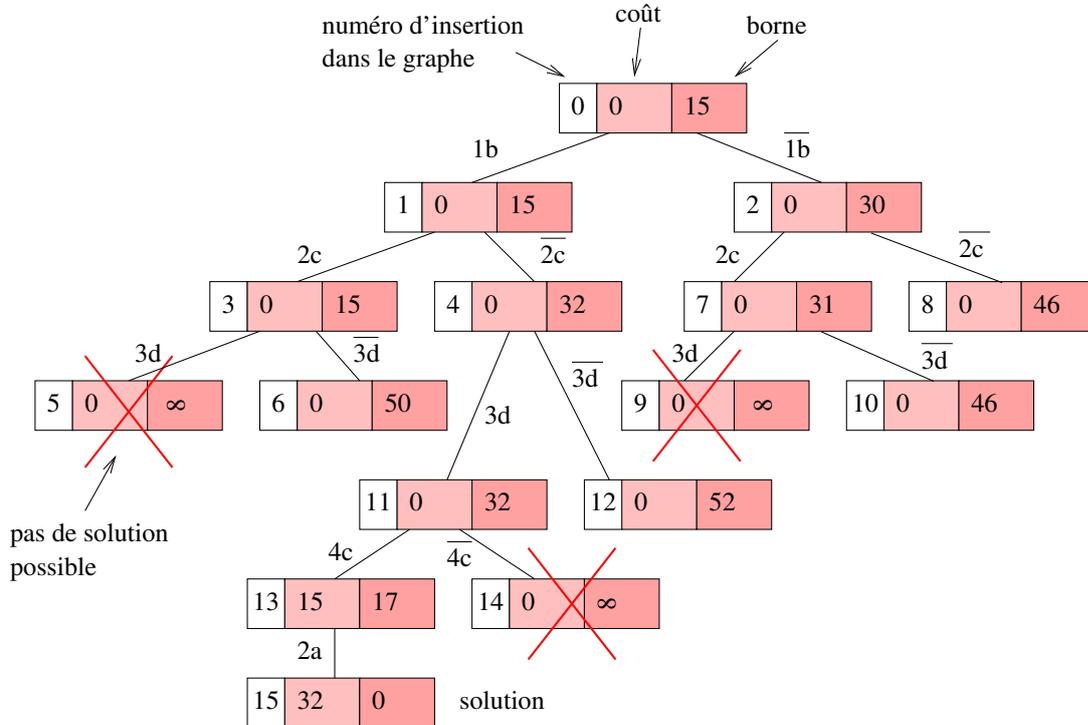


FIG. 6.1 – Graphe de recherche par l'algorithme *Branch & Bound*.

6.1.4 Performances

Afin d'évaluer les performances de l'affectation de *slots*, nous avons comparé le nombre d'itérations et le coût final entre la solution optimale et la recherche de la première solution. Les valeurs présentées dans le tableau suivant correspondent à 1000 tirages aléatoires de configurations initiales et finales pour six UAVs. Les slots sont placés dans un corridor de 200 mètres,

mais les distances minimums ne sont pas nécessairement respectées car cela n'a pas d'influence sur le fonctionnement de l'algorithme.

	moyenne	écart
nombre d'itérations (optimal)	55,1	194,9
nombre d'itérations (1 ^{re} solution)	7,7	4,1
coût (optimal)	187,8	48,4
coût (1 ^{re} solution)	201,6	50,1
augmentation du coût	6.9 %	

Le temps de calcul a été mesuré à partir d'une implémentation C++ sur un processeur Intel Centrino à 1,6 GHz avec 512 Mo de RAM. Pour la solution optimale, il ne dépasse pas 4ms en moyenne pour des formations jusqu'à huit UAVs. À partir de 13 UAVs, le temps de calcul moyen dépasse 0,5s, avec un écart type très important de plus de 2s et une utilisation importante de la mémoire. Pour une formation de plus de 30 UAVs, lors de la recherche de la première solution, le comportement observé est similaire, mais survient beaucoup plus tard.

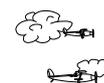
Notre conclusion est que pour des formations de taille limitée à une dizaine d'engins, le coût de recherche d'une solution optimale est relativement faible. Il est donc à privilégier. Pour des formations un peu plus grandes, il est préférable de commencer à chercher une première solution, puis éventuellement la solution optimale si le temps le permet. Les formations de très grandes dimensions ne rentrent pas dans le cadre de cette étude.

6.2 Les trajectoires de reconfiguration

6.2.1 Objectifs

L'objectif des trajectoires de reconfiguration est de permettre à la formation de passer en toute sécurité d'une configuration à une autre. Ces situations à risques se présentent lorsque d'importants changements interviennent dans la configuration et qu'au moins un des avions doit faire un grand déplacement relativement aux autres avions. La reconfiguration est déclenchée par le dépassement d'un seuil, qui peut être déterminé à partir de la précision d'asservissement des avions sur les *slots*.

Cette problématique a donné lieu à de très nombreuses études et à diverses solutions, que ce soit dans le domaine de la robotique terrestre, aérienne ou spatiale, aussi bien avec des méthodes comportementales que de planification de trajectoires. Pour des raisons de blocage, en cas de symétrie notamment, il est préférable d'écarter complètement l'utilisation de champs de potentiel. Concernant la planification de trajectoire par des méthodes de programmation linéaire, la solution distribuée proposée par Raffard *et al.* {2004}, si elle conserve l'optimalité d'un système centralisé, nécessite d'échanger une grande quantité d'informations, et de façon itérative, ce qui



peut être préjudiciable si la bande passante est limitée ou risque de subir des perturbations. Pourtant cette approche permet de réduire de façon notable la complexité algorithmique et l'utilisation des ressources mémoire. La solution proposée par Zelinski *et al.* {2003} n'est pas adaptée dans notre cas. En effet, les configurations n'y sont pas fixées à l'avance et, si le calcul est réalisé hors ligne, c'est pour des raisons de ressources de calcul limitées. C'est d'ailleurs le problème majeur de toutes ces solutions pour des applications temps réel. Une solution pour diminuer cette difficulté consiste à calculer sur un horizon temporel limité, mais cela demande de prendre certaines précautions {Schouwenaars *et al.*, 2001, 2002}. L'efficacité de ces méthodes a été suffisamment améliorée pour être utilisées avec succès sur des véhicules capables de faire du vol stationnaire {Schouwenaars *et al.*, 2006}. En marquant des temps d'arrêt à la fin de chaque portion de trajectoire, on peut vérifier que le calcul de la portion suivante est achevé.

Une hypothèse pour simplifier le problème de la reconfiguration est de considérer que dans un repère local à la formation, les avions peuvent se déplacer comme des objets libres. Pour que cette hypothèse soit vérifiée, il faut qu'ils se déplacent suffisamment lentement, ce qui revient en pratique à réduire leur dynamique. On prend aussi le risque de rallonger considérablement le temps d'exécution de ces manœuvres. En contrepartie, il est possible de séparer le calcul de la trajectoire globale de la formation et celui des trajectoires particulières des avions. Il devient ainsi plus simple d'utiliser des techniques de recherche de graphe ou de *roadmaps* probabilistes (PRM, Probabilistic Roadmaps) {Svestka et Overmars, 1998}. Une variante plus récente des PRM, les RRTs (Rapidly-exploring Random Trees) proposés par LaValle et Kuffner {1999} et LaValle {2006} sont également très prometteurs pour ce type d'application {Garcia et How, 2005}. Ils permettent de résoudre des problèmes très complexes en relâchant la contrainte de complétude. Pourtant si les RRTs sont surtout adaptés pour résoudre des problèmes de reconfiguration sous fortes contraintes dans des temps raisonnables, leur utilisation reste trop lente pour des applications temps réel.

La solution que nous avons retenue se base sur l'algorithme A* {Dechter et Pear, 1985; Russel et Norvig, 1995}. Si A* permet de trouver la solution optimale d'un problème comme la planification de trajectoire, dans le cas multi-robots, cela devient très rapidement impossible à calculer pour un système embarqué. Il est donc indispensable de découper le problème pour se ramener à plusieurs recherches de trajectoires élémentaires. Le résultat ainsi obtenu est sous-optimal et incomplet, mais est efficace de façon pratique comme le montre l'analyse des performances menée en section 6.2.5.

6.2.2 L'algorithme A* multi-robots

Principe

Le principe de fonctionnement de l'algorithme, très proche des méthodes de fusion de plan (Plan Merging Protocol), est de calculer des trajectoires pour chacun des *slots* en utilisant

A^* , indépendamment des autres et sans contrainte. Une fois toutes ces trajectoires initialisées, on recherche à chaque étape s'il y a des conflits entre deux trajectoires et, si tel est le cas, on essaye de supprimer ce conflit en recalculant l'une ou l'autre des trajectoires incriminées. Rappelons également que ces trajectoires correspondent à des mouvements dans le repère local de la formation et non aux trajectoires réelles des avions dans un repère terrestre.

Il ressort de cette recherche des conflits que le temps doit être pris en compte dans le calcul des trajectoires. En effet, du point de vue d'un *slot*, les trajectoires des autres sont des obstacles mobiles dont la position est connue à chaque instant. Pour rendre l'algorithme plus efficace, il est également intéressant de permettre aux *slots* de marquer des temps d'arrêt pour laisser passer un autre *slot*. Par extension, le fait de pouvoir quitter sa position finale pour faciliter le passage d'un *slot* permet de mieux équilibrer les déplacements.

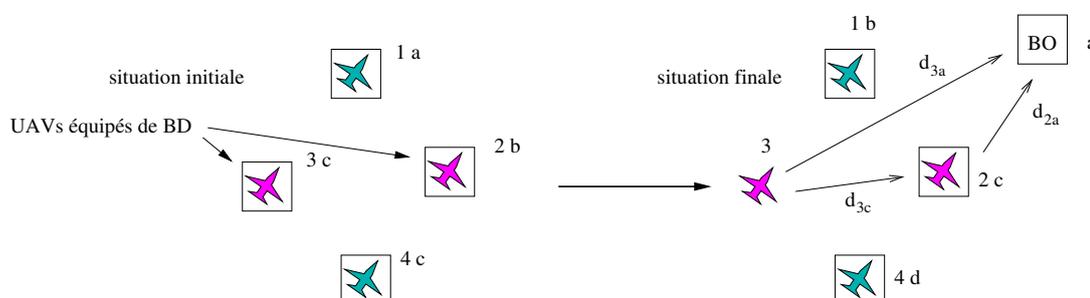


FIG. 6.2 – Exemple de configuration initiale et finale pour une reconfiguration.

Prenons l'exemple de la figure 6.2, correspondant au cas 1 de la figure 5.7. L'avion 3 a une longue distance à parcourir pour rejoindre la position a . Supposons qu'il ne peut pas passer entre les avions 1 et 2 à cause des distances de sécurité. Il se retrouve obligé de contourner les autres avions, ce qui rallonge sa trajectoire et affaiblit potentiellement la formation puisqu'il est supposé assurer le brouillage offensif. Pour être plus réactif, il faudrait que 1 ou 2 s'écarte pour le laisser passer. Cela n'est pas possible en ne prenant en compte que la distance, puisque les avions déjà sur leur position finale ne peuvent pas la quitter. Nous avons donc ajouté une dimension, correspondant au temps, à l'espace de recherche.

Le graphe de recherche du A^* va donc se baser sur un maillage régulier avec trois dimensions d'espace et une dimension de temps, cette dernière n'étant bien sûr explorée que dans une seule direction. La figure 6.3 illustre cette structure. On remarque notamment la possibilité de rester sur place. La position finale est donc déterminée par une position et un temps (ou une étape de la trajectoire) minimum avant lequel le *slot* n'est pas considéré comme ayant atteint la position finale. Il y a plusieurs façons de choisir ce temps final que nous détaillons plus loin.

Cette dimension de temps pose inévitablement la question de la fonction de coût et en particulier de la pondération entre le coût d'un déplacement et le coût d'un « non-déplacement ». Notre objectif étant de favoriser les déplacements des avions, tout en leur permettant le cas



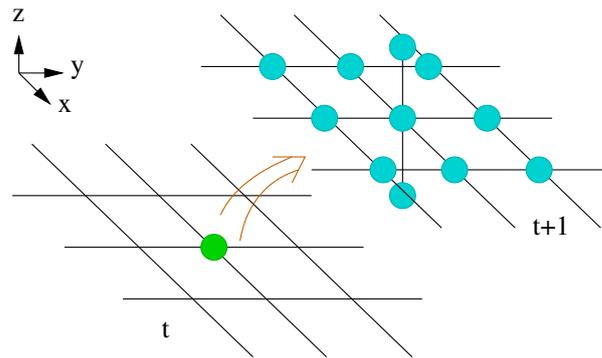


FIG. 6.3 – Le maillage régulier du A^* , avec trois dimensions d'espace et une dimension de temps. À partir d'un nœud à l'instant t , on peut accéder à 11 nœuds à l'instant $t + 1$.

échéant de rester sur place, le coût lié à l'action de ne pas bouger est plus important que celui d'un déplacement et a été arbitrairement fixé au double.

Initialisation

La phase d'initialisation consiste à calculer des trajectoires directes pour les avions sans tenir compte des autres. La seule contrainte est de ne pas sortir du corridor, c'est-à-dire de ne pas s'éloigner du centre de plus de la distance d_{cor} . L'étape d'arrivée est fixée à t_0 , l'instant de départ. Cela signifie que la recherche avec le A^* est uniquement spatiale et que le résultat est le plus court chemin entre le *slot* de départ et le *slot* d'arrivée.

Itération

A chaque étape, on teste les positions des *slots* pour détecter d'éventuelles collisions, c'est-à-dire si deux *slots* passent en-deçà de la distance minimale ou au delà de la distance maximale. Ainsi, s'il y a une collision à l'instant t_i entre deux *slots*, la trajectoire de l'un des deux est recalculée. Une première tentative est faite pour la trajectoire la plus courte, puis, en cas d'échec, avec l'autre. L'objectif est d'équilibrer les longueurs des trajectoires et donc potentiellement la consommation des avions, même s'il n'y a pas de garantie pour ce dernier point. Dans tous les cas, entre t_0 et t_i , les trajectoires des autres avions sont prises en compte pour ne pas créer de nouveaux conflits avant t_i et le A^* est utilisé dans l'espace spatio-temporelles. Ainsi l'étape finale t_f doit être choisie entre t_i et t_{max} , le temps d'arrivée de la plus longue trajectoire. Au-delà, les contraintes ne sont plus prises en compte et le *slot* se dirige vers sa position finale.

Une fois que tous les conflits à l'instant t_i ont été supprimés, on passe à l'étape suivante. Il est possible que l'algorithme ne puisse pas aboutir. Cela se produit quand un conflit n'a pas pu être éliminé en recalculant l'une ou l'autre des trajectoires incriminées, ou si la recherche dépasse certaines limites : nombre de nœuds explorés, nombre d'étape de reconfiguration ou temps de

calcul maximal. Dans ces cas, la configuration de la formation reste inchangée, et une nouvelle planification est réalisée à l'itération suivante, avec de nouvelles conditions, si cela est nécessaire. La figure 6.4 résume la procédure.

6.2.3 Améliorations

Des améliorations ont pu être apportées à l'algorithme pour le rendre plus rapide, prendre en compte des priorités ou obtenir des trajectoires plus lisses.

Élimination des conflits

Comme signalé plus haut, le choix du temps d'arrivée a une influence sur l'élimination des conflits et sur l'équilibrage entre les longueurs des trajectoires.

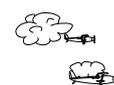
Si on choisit $t_f = t_i$, la collision détectée à l'instant t_i va être évitée, mais il y a une forte probabilité qu'une nouvelle collision se produise à l'instant suivant. L'intérêt de procéder ainsi est d'avoir un meilleur équilibrage entre les trajectoires, puisque l'on remet en cause à chaque étape le choix de la trajectoire à recalculer. De plus, une fois l'instant t_i dépassé, la fin de la trajectoire est rapide à calculer puisque sans contrainte. Le premier point négatif de cette solution est bien sûr d'avoir à recalculer plusieurs fois des trajectoires avec à chaque fois des modifications mineures. Le second, moins évident, est que l'on observe des phénomènes d'oscillations où la trajectoire recalculée change à chaque étape et reproduit le même conflit une ou deux étapes plus loin. L'algorithme peut rester bloqué sur ce conflit, à moins d'être limité sur le nombre maximal d'étapes. En pratique, cette situation se présente assez fréquemment. Ce choix est donc à éviter.

Une autre solution est de choisir $t_f = t_{max}$. Ainsi, dès qu'un conflit apparaît sur une trajectoire, tous les conflits avec les autres trajectoires sont éliminés. Cela permet un calcul évidemment beaucoup plus rapide, avec l'inconvénient majeur que pour tous les conflits, en dehors du premier qui a déclenché le calcul, il n'y a pas d'équilibrage entre les trajectoires. Le résultat est donc plus éloigné d'une solution optimale où les distances sont plus équitables.

Une piste qui reste à explorer est de déterminer automatiquement l'instant t_f en se basant sur la fin du conflit qui a déclenché le calcul ou l'apparition d'un autre conflit. On peut également envisager de relâcher une partie des contraintes en considérant toutes les trajectoires comme obstacles entre t_0 et t_i , et uniquement la trajectoire en conflit entre t_i et t_{max} .

Avions prioritaires

Les avions chargés de réaliser le brouillage offensif doivent se rendre le plus rapidement possible sur leur *slot* paramétrique pour être tout à fait efficaces dans la protection de la formation.



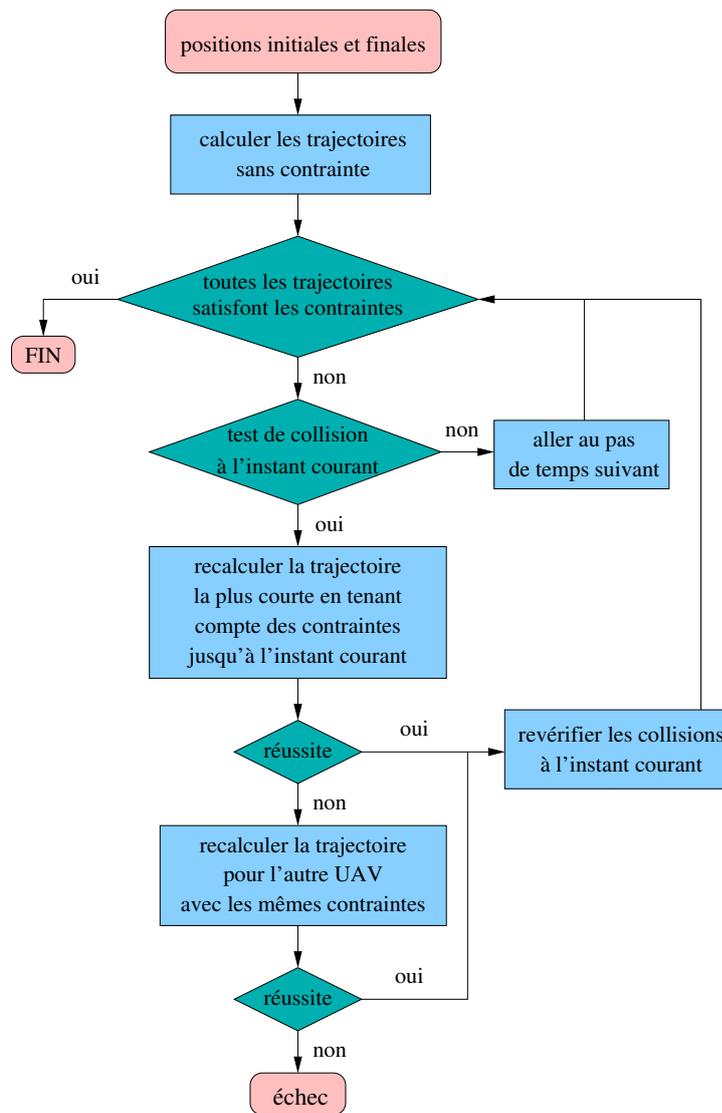


FIG. 6.4 – L’algorithme de planification de trajectoires multi-robots à base de A*.

Il est donc naturel de leur donner une priorité plus importante au cours des déplacements. Lors du choix de la première trajectoire à recalculer, on prend ainsi en plus un paramètre de priorité :

- la trajectoire recalculée est celle de plus faible priorité ;
- si deux trajectoires sont de même priorité, c'est la plus courte qui est remise en cause.

Configurations non valides

S'il est possible de vérifier qu'une configuration finale respecte par construction toutes les contraintes, ce n'est pas toujours le cas pour les configurations de départ. Ceci peut se produire si l'on initialise la configuration courante à partir de la position réelle des avions, ou s'il y a un changement des distances de sécurité. L'algorithme A^* dans sa forme la plus simple peut se retrouver bloqué dans de tels cas, car aucun des nœuds voisins du point de départ ne serait valide, ce qui conduirait à un échec systématique. Afin de se sortir de cette situation, on autorise les *slots* à violer certaines contraintes s'ils se trouvent à des positions initiales non valides. Une fois qu'ils respectent les contraintes, ou s'ils partent de positions valides, ils ne sont plus autorisés à passer outre les contraintes. De plus, le coût d'un déplacement dans une zone non valide est très élevé, de façon à limiter le temps passé à violer les contraintes.

6.2.4 Lissage

Les trajectoires finales des avions sont bien sûr saccadées à cause de la discrétisation spatiale de l'espace de recherche pour l'algorithme A^* . Cette situation se retrouve avec l'utilisation d'autres méthodes de calcul. Garcia et How {2005}, dans leur solution exploitant les RRTs, proposent d'utiliser un opérateur de lissage de façon à assouplir les courbes. Les RRTs permettant de prendre en compte des paramètres de la dynamique des systèmes, le lissage se fait par la résolution de problèmes de programmation linéaire appliqués par petites itérations. Notre solution ne tient pas compte de la dynamique des avions pour le calcul des trajectoires de reconfiguration. Il est donc possible d'utiliser une méthode de résolution plus simple.

Bortoff {2000} propose comme méthode de planification de trajectoire une solution basée sur la dynamique d'une chaîne de masselottes reliées par des ressorts. On peut retenir ce principe pour le lissage des courbes. Chaque étape d'une trajectoire de reconfiguration est considérée comme une masselotte mobile dans un environnement visqueux (pour l'amortissement) soumise à deux tensions élastiques avec la masse qui la suit et celle qui la précède comme indiqué sur la figure 6.5. Il suffit alors de simuler le mouvement des masselottes en se basant sur le principe fondamental de la dynamique, en tenant compte des restrictions suivantes :

- s'il n'y a pas de conflits, la masselotte est libre de bouger ;
- s'il y a un conflit (distance trop petite ou trop grande avec une des autres masselottes), la masselotte ne peut bouger que si cela diminue le conflit ;
- les points de départ et d'arrivée sont fixes.



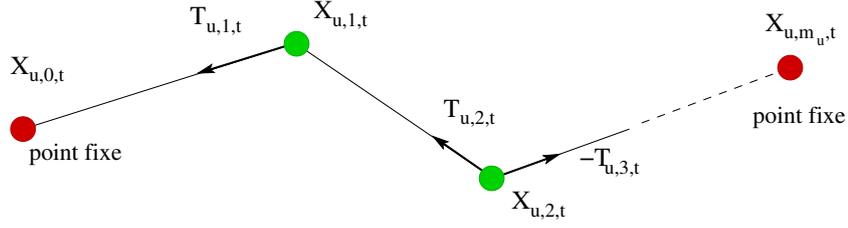


FIG. 6.5 – Une chaîne de masselottes utilisée pour lisser les trajectoires. Les points rouges sont les extrémités fixes, les points verts sont mobiles.

Ainsi, on pose l'état de la masselotte $i \in [0, m_u]$ de la trajectoire de reconfiguration $u \in [1, n]$ au pas de simulation t :

$$\mathbf{X}_{u,i,t} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

avec les conditions aux limites :

$$\forall u, \forall t \quad \dot{\mathbf{X}}_{u,0,t} = \vec{0} \quad \text{et} \quad \dot{\mathbf{X}}_{u,m_u,t} = \vec{0} \quad (6.4)$$

où n est le nombre de trajectoires (et donc d'UAVs dans la formation), m_u est le nombre de pas de reconfiguration de la trajectoire u et $\dot{\mathbf{X}}_t$ est la vitesse de la masselotte associée à \mathbf{X}_t à l'instant t .

On suppose que les masselottes ont toutes une masse m identique et invariante dans le temps, de même que les coefficients de raideur k et d'amortissement f . Une masselotte est soumise à deux forces de tension (équation (6.5) et (6.6)) et une force de frottement (équation (6.7)) :

$$\mathbf{T}_{u,i,t} = k(\mathbf{X}_{u,i-1,t} - \mathbf{X}_{u,i,t}) \quad (6.5)$$

$$\mathbf{T}_{u,i+1,t} = k(\mathbf{X}_{u,i,t} - \mathbf{X}_{u,i+1,t}) \quad (6.6)$$

$$\mathbf{F}_{u,i,t} = -f\dot{\mathbf{X}}_{u,i,t} \quad (6.7)$$

Le principe de la dynamique peut s'écrire de la façon suivante avec $\ddot{\mathbf{X}}_t$ l'accélération de la masselotte associée à \mathbf{X}_t à l'instant t .

$$\forall u, \forall t, \forall i \in]0, m_u[\quad m\ddot{\mathbf{X}}_{u,i,t+1} = \mathbf{T}_{u,i,t} - \mathbf{T}_{u,i+1,t} + \mathbf{F}_{u,i,t} \quad (6.8)$$

A chaque itération, les trajectoires sont sélectionnées successivement et pour chacune, on calcule un déplacement élémentaire pour chacun de ses nœuds et pour un pas de simulation Δt ,

en suivant les équations suivantes :

$$\ddot{\mathbf{X}}_{u,i,t+1} = \frac{k}{m}(\mathbf{X}_{u,i-1,t} + \mathbf{X}_{u,i+1,t} - 2\mathbf{X}_{u,i,t}) - \frac{f}{m}\dot{\mathbf{X}}_{u,i,t} \quad (6.9)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_{u,i,t+1} = \dot{\mathbf{X}}_{u,i,t} + \Delta t \cdot \ddot{\mathbf{X}}_{u,i,t+1} \quad (6.10)$$

$$\mathbf{X}_{u,i,t+1} = \mathbf{X}_{u,i,t} + \Delta t \cdot \dot{\mathbf{X}}_{u,i,t+1} \quad (6.11)$$

$$\text{avec } \forall t \quad \|\dot{\mathbf{X}}_{u,i,t}\| \geq 0 \quad (6.12)$$

$$\text{et si } \forall i, \forall t, \exists v \in [1, n], v \neq u \quad \|\mathbf{X}_{u,i,t} - \mathbf{X}_{v,i,t}\| \leq d_{min} \quad (6.13)$$

$$\text{et } \|\mathbf{X}_{u,i,t+1} - \mathbf{X}_{v,i,t+1}\| \leq \|\mathbf{X}_{u,i,t} - \mathbf{X}_{v,i,t}\| \quad (6.14)$$

$$\text{alors } \|\dot{\mathbf{X}}_{u,i,t}\| = 0 \quad (6.15)$$

où d_{min} est la distance minimale entre les avions. Les équations (6.13) à (6.15) servent à gérer les conflits lors du lissage. L'algorithme s'arrête lorsque le plus grand déplacement est inférieur à un seuil fixé ou si le temps de calcul dépasse une durée maximale.

La dynamique de ces systèmes est d'ordre 2. Pour avoir une réponse rapide, on cherche à avoir un amortissement ξ de 0,7. Ainsi le coefficient de frottement f est fixé par la relation :

$$f = 2\xi\sqrt{mk} = 1,4\sqrt{mk} \quad (6.16)$$

Un autre intérêt de l'opération de lissage est qu'elle est totalement découplée du calcul des trajectoires par le A*. La procédure est donc d'effectuer le calcul des trajectoires de reconfiguration lorsque cela est nécessaire. La consigne de position des *slots* envoyée à cette étape correspond à la position initiale. À l'itération suivante dans la mise à jour de la configuration, le lissage est effectué avant toute mise à jour de la position des *slots*.

6.2.5 Performances

Afin d'évaluer les performances de notre algorithme en termes de temps de calcul, nous avons effectué des tirages aléatoires de configurations initiales et finales (toutes valides) et nous avons mesuré le temps de calcul moyen pour des formations de tailles différentes et pour différents pas de déplacement du A*. Ces mesures ont été réalisées à partir d'une implémentation C++ (voir § 7.1) sur un processeur Intel Centrino 1.6 GHz avec 512 Mo de mémoire vive. 600 à 800 tirages aléatoires ont été effectués pour chaque point.

La figure 6.6 montre le temps de calcul moyen avec son écart type pour des groupes de deux à huit engins. Les configurations initiales et finales sont dans un cercle de 200 mètres de rayon, la distance minimale entre les slots est de 40 mètres et le pas de déplacement est de 8 mètres. On peut constater que malgré des variations importantes, surtout pour de grandes formations, le temps de calcul reste relativement bas et compatible avec des applications temps-réel.



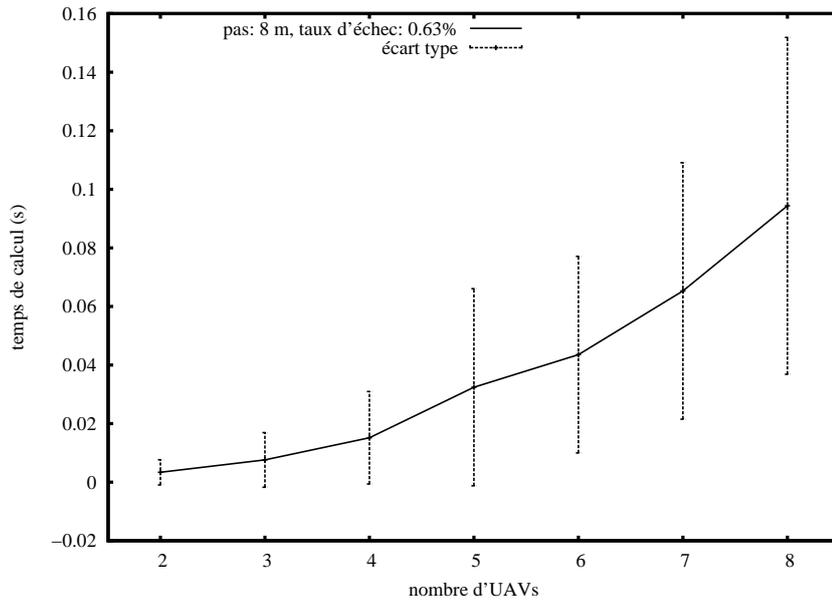


FIG. 6.6 – Temps de calcul moyen avec les écarts types pour un pas de déplacement de 8m et une distance minimale entre UAVs de 40m.

Les courbes de la figure 6.7 montrent le temps de calcul moyen dans les mêmes conditions que précédemment pour des pas de déplacement différents. La première chose que l'on peut constater est que plus le pas de déplacement est grand, plus le calcul est rapide. Ce résultat n'est bien sûr pas surprenant : en agrandissant le pas, on explore moins de nœuds pour arriver au résultat. Pourtant, ce résultat cache le fait que plus le pas est grand, plus les marges à prendre pour éviter les collisions sont importantes. Des marges plus grandes ont également pour effet de rallonger la longueur des trajectoires de reconfiguration et peuvent éventuellement bloquer certaines solutions accessibles avec une discrétisation plus fine. On constate d'ailleurs une augmentation du taux d'échec (plus exactement une interruption de la planification) pour le pas de 10 mètres, alors qu'un minimum est atteint pour 8 mètres. Un pas de déplacement trop faible, comme par exemple 6 mètres, augmente fortement le taux d'échecs. Ce résultat s'explique en partie par le fait que les calculs dépassent plus souvent le temps ou le nombre d'étapes de reconfiguration maximum.

Le choix du pas de déplacement est donc un compromis entre la rapidité de calcul et le taux de réussite de l'algorithme. Dans la configuration présentée, un pas de 8 mètres semble être la meilleure solution. Il est malheureusement très difficile de choisir cette valeur automatiquement à partir d'autres paramètres du système. La borne maximale que l'on peut identifier est la distance minimale entre les slots, puisque l'on est sûr de ne pas trouver d'autres slots dans cette zone. Nous espérons qu'une étude plus poussée, aussi bien sur des configurations aléatoires que pour des situations pratiques, permettra de trouver une expression empirique du pas de reconfiguration à partir de paramètres, comme la distance de sécurité et la largeur du corridor.

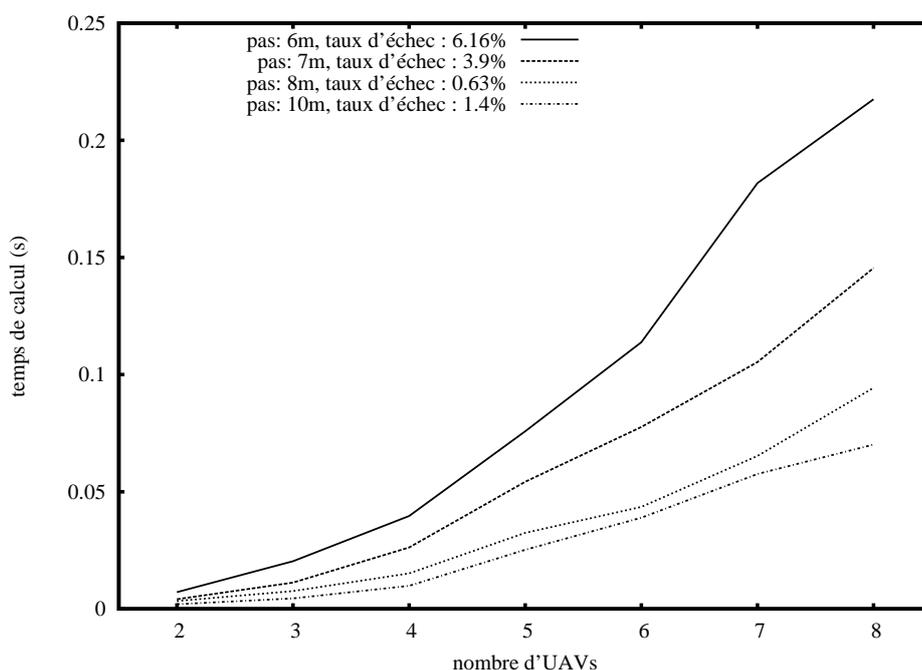


FIG. 6.7 – Comparaison des temps de calculs pour différents pas de déplacement.

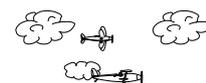
6.3 Le contrôle de la formation

6.3.1 Objectifs

Le rôle de la couche de formation est de faire le lien entre les niveaux décisionnels et fonctionnels, c'est-à-dire produire une configuration pour la formation à partir des contraintes de la mission. Le contrôle de la formation ne fait donc pas partie, à proprement parler, de cette couche intermédiaire. Pourtant elle se place naturellement au dessus du système de vol des avions et utilise des informations que l'on trouve au niveau de la couche de formation, notamment l'état des avions et les données de la *timeline*.

Les différentes stratégies de commande ont été présentées à la section 2.5.4. La solution retenue se base pour l'essentiel sur les méthodes comportementales {Balch et Arkin, 1998}, couplées à un algorithme de suivi de trajectoire {Park *et al.*, 2004}. Ce choix est motivé par la simplicité et la robustesse de ces méthodes. De plus, elles n'augmentent pas l'utilisation de la bande passante pour les communications, si l'on considère que les avions doivent de toute façon échanger leurs positions. Ceci contribue notamment à améliorer la robustesse du système à ce niveau d'asservissement.

D'autres méthodes méritent néanmoins d'être explorées pour avoir une exécution plus rapide de certaines manœuvres, notamment des trajectoires de reconfiguration. Seule la solution citée plus haut a été testée.



6.3.2 Le suivi de trajectoire et le contrôle de formation

À partir d'une configuration et de la trajectoire de référence de la formation, le contrôleur doit réaliser les trois tâches suivantes :

1. placer le centre de la formation sur la trajectoire de référence ;
2. garder la géométrie de la formation, c'est-à-dire placer les avions sur leurs *slots* ;
3. éviter les collisions entre les avions.

Suivi de trajectoire

Le premier point est assuré par l'algorithme de suivi de trajectoire proposé par Park *et al.* {2004}. Il s'agit d'un contrôle non-linéaire qui se base sur un point de référence appartenant à la trajectoire, à une distance L constante de l'avion (des précautions sont à prendre quand un avion se trouve à une distance supérieure). En se basant sur les conventions de la figure 6.8, l'accélération latérale de consigne est déterminée par la relation :

$$a_{l_{cmd}} = 2 \frac{\|\mathbf{V}\|^2}{L} \sin \eta \quad (6.17)$$

où \mathbf{V} est le vecteur vitesse de l'avion. On note la portance d'un engin F , sa masse m , l'angle de roulis ϕ et l'accélération de la gravité g . À partir des deux relations suivantes :

$$F \cos \phi = m g \quad (6.18)$$

$$F \sin \phi = m a_l \quad (6.19)$$

on peut définir un angle de roulis de consigne ϕ_{cmd} qui va servir d'entrée au système de vol de l'avion :

$$\phi_{cmd} = \arctan \left(\frac{a_{l_{cmd}}}{g} \right) \quad (6.20)$$

Pour que les avions suivent tous des trajectoires parallèles correspondant à leur place dans la formation, il suffit de décaler le point de référence d'une valeur égale à la position du *slot* par rapport au centre de la formation. De plus, les avions peuvent s'asservir en vitesse en se basant sur le temps nominal d'arrivée au prochain point de passage. Ainsi, la formation est potentiellement capable de voler en « boucle ouverte » pendant de petits laps de temps, pour peu qu'elle soit déjà stabilisée.

Contrôle réactif distribué

Quoi qu'il en soit, le simple suivi de trajectoire n'est pas suffisant pour assurer la stabilité de la formation. Il faut pour cela « fermer la boucle » en asservissant les avions les uns par

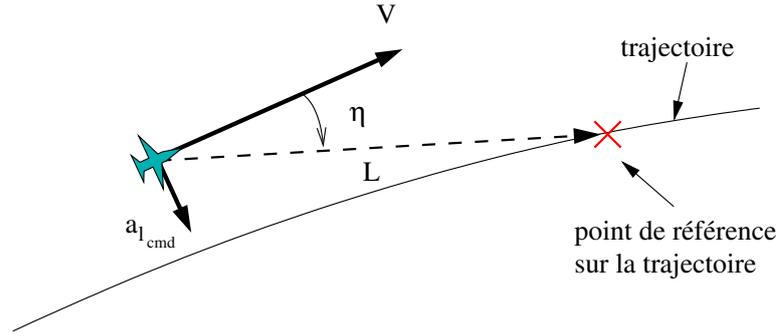


FIG. 6.8 – Les conventions pour le suivi de trajectoire.

rapport aux autres. Le contrôleur s'inspire des méthodes comportementales proposées par Balch et Arkin {1998}. Les deux comportements recherchés correspondent aux deuxième et troisième points, à savoir le respect de la configuration et l'évitement de collisions. La fréquence de cet asservissement dépend de la fréquence à laquelle on peut obtenir la position des avions (pour notre dispositif expérimental, elle est d'environ 4 Hz, voir chapitre 7).

On se place du point de vue de l'UAV i , dont la position est \mathbf{x}_i . Une première force, dite de « formation », notée \mathbf{F}_i , maintient la géométrie de la formation :

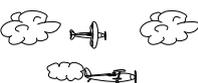
$$\mathbf{F}_i = \frac{1}{k} \sum_{j \in \Omega(i)} ((\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) - \Delta P_{ij}) \quad (6.21)$$

où $\Omega(i)$ est l'ensemble des UAVs dont l'état est reçu par l'UAV i , k est le cardinal de $\Omega(i)$ et ΔP_{ij} est la position théorique de l'UAV j par rapport à l'UAV i . Pour que la géométrie de la formation soit conservée, il faut au moins que chaque avion reçoive la position d'un autre avion sans créer de boucles de communication indépendantes. En augmentant les redondances, on rend la formation plus « rigide », c'est-à-dire que la géométrie pourra être respectée avec plus de précision. L'inconvénient est une plus grande utilisation de la bande passante. Néanmoins, cette solution est robuste à des pertes importantes de messages (voir § 6.13), on peut donc se permettre d'avoir des fréquences d'émission plus faibles quand les communications ne sont pas brouillées.

La force (6.21) correspond à la composante « proportionnelle » d'un correcteur. Or, si le système est stable, les simulations ont montré que l'amortissement était assez faible. Pour avoir une réponse plus rapide du système avec un dépassement plus faible, on va donc ajouter une force d'égalisation des vitesses dans la formation qui va jouer le rôle de la composante « dérivée » du correcteur :

$$\mathbf{S}_i = \left(\frac{1}{k'} \sum_{j \in \Omega'(i)} \dot{\mathbf{x}}_j \right) - \dot{\mathbf{x}}_i \quad (6.22)$$

où $\Omega'(i) = \Omega(i) \cup i$, k' est le cardinal de $\Omega'(i)$ et $\dot{\mathbf{x}}_i$ le vecteur vitesse de l'avion i . Les performances



du contrôle réactif concernant ces deux premières forces sont étudiées à la section 6.3.4.

Le dernier point du contrôle réactif est l'évitement de collisions. Cette réaction est obtenue par une force de répulsion qui tend vers l'infini lorsque deux avions se rapprochent de la distance minimale d_{min} :

$$\mathbf{R}_i = \sum_{j \in \Omega(i)} \frac{1}{(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - d_{min}) \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} \quad (6.23)$$

En pratique, la force \mathbf{R}_i est bornée par une valeur de saturation qui correspond à la pleine efficacité des gouvernes. De plus, cette force reste à saturation pour tout $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \leq d_{min}$. La réaction d'évitement ne peut se produire que s'il y a une communication directe entre les deux avions concernés, contrairement au maintien de la géométrie. On fait donc l'hypothèse, assez réaliste, que la communication pour un avion donné est meilleure avec les avions qui sont les plus proches de lui, c'est-à-dire ceux qui sont directement concernés par le risque de collision. L'objectif est bien entendu de faire le moins possible appel à ce type de réaction. En effet, cela signifie que les avions ne respectent plus la géométrie ou que la configuration produite par le système n'est pas valide. Les échecs de ce système anti-abordage sont donc dans la plupart des cas à rechercher ailleurs.

Les trois forces (6.21), (6.22) et (6.23) sont exprimées dans un repère global NED (North-East-Down : x vers le nord, y vers l'est, z vers le bas). On définit un repère local UAV, dont le vecteur x est aligné avec la direction de l'avion. On passe du repère NED à UAV par une rotation égale au cap de l'avion autour de l'axe vertical (voir équation (6.24) et figure 6.9). La réaction globale de l'avion est déterminée dans le repère UAV par la composition des trois forces élémentaires :

$$\mathbf{X}_{i,UAV} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_{i,NED} \quad (6.24)$$

$$\mathbf{M}_{i,UAV} = \mathbf{a}(\psi_i) \cdot \mathbf{F}_{i,UAV} + \mathbf{b}(\psi_i) \cdot \mathbf{S}_{i,UAV} + \mathbf{c}(\psi_i) \cdot \mathbf{R}_{i,UAV} \quad (6.25)$$

où \mathbf{a} , \mathbf{b} et \mathbf{c} sont des vecteurs de coefficients positifs, fonction de ψ_i , le cap de l'UAV i . Notons que l'opérateur « \cdot » est ici la multiplication élément à élément entre deux vecteurs. Ces différentes réactions n'ont pas le même rôle à jouer et, pour être efficaces, elles ne doivent pas agir sur les mêmes commandes. Ainsi pour un avion classique :

- la dynamique du moteur est plutôt lente, mais permet de synchroniser des avions suivant des trajectoires parallèles ;
- la dynamique des ailerons et de la profondeur est plus rapide et permet des changements de trajectoire rapide, mais n'est pas très utile s'il y a déjà un système de suivi de trajectoire.

Notre idée est donc d'avoir un gain fort dans l'axe longitudinal de l'avion pour les forces \mathbf{F}_i et \mathbf{S}_i , pour synchroniser la vitesse des avions en laissant faire le système de suivi de trajectoire, avec des gains plus faibles sur l'axe perpendiculaire. Inversement, pour la force d'évitement \mathbf{R}_i , il est plus efficace d'avoir des gains forts sur la correction de cap et d'altitude, plutôt que sur la

poussée des moteurs. Le profil des coefficients est de type ellipsoïdal et correspond aux équations suivantes pour \mathbf{F}_i par exemple (voir figure 6.9) :

$$\mathbf{F}_{i,UAV} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

$$u = \text{angle} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \right) \quad u \in]-\pi, \pi] \quad (6.27)$$

$$v = \text{angle} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_i \right) \quad v \in [0, \pi] \quad (6.28)$$

$$\mathbf{a}(\psi) = \begin{bmatrix} |\alpha_a \cos(u) \sin(v)| \\ |\beta_a \sin(u) \sin(v)| \\ |\gamma_a \cos(v)| \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

Le vecteur $\mathbf{a}(\psi)$ est exprimé dans le repère UAV à travers u et v . Au final, les éléments du vecteur doivent tous être positifs (équation 6.29).

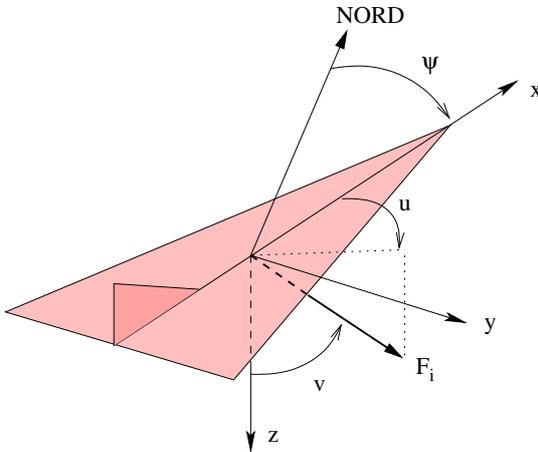


FIG. 6.9 – Les conventions d’orientation des angles.

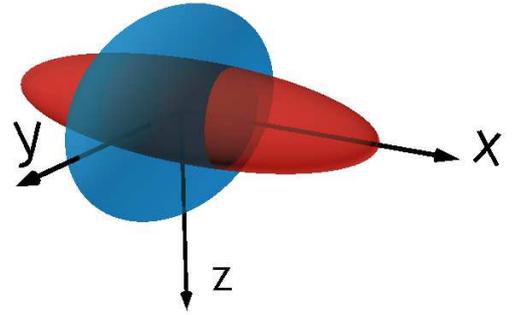
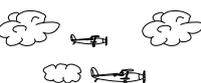


FIG. 6.10 – Représentation des coefficients pour le contrôle réactif dans le plan horizontal. La correction \mathbf{a} est principalement selon l’axe x (en rouge), la correction \mathbf{c} selon les axes y et z (en bleu).

Les coefficients (positifs) α , β et γ définissent la forme d’un ellipsoïde d’équation $\frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\beta^2} + \frac{z^2}{\gamma^2} = 1$, l’axe x pointant vers le nez de l’appareil. Pour satisfaire les critères présentés au paragraphe précédent, il faut donc avoir :

- pour la force \mathbf{F}_i : $\beta_a < \alpha_a$ et $\gamma_a < \alpha_a$;



- pour la force \mathbf{S}_i : $\beta_b < \alpha_b$ et $\gamma_b < \alpha_b$;
- pour la force \mathbf{R}_i : $\alpha_c < \beta_c$ et $\alpha_c < \gamma_c$.

La figure 6.10 montre une représentation des coefficients \mathbf{a} et \mathbf{c} .

La force \mathbf{M}_i , exprimée dans le repère UAV, permet d'obtenir des corrections sur la vitesse $v_{correction}$, l'inclinaison $\phi_{correction}$ (équivalant à une vitesse de changement de cap $\dot{\psi}_{correction}$) et l'altitude $h_{correction}$. Cette solution a été proposée par Balch et Arkin {1998} et correspond à la façon dont les pilotes humains réalisent des corrections lors d'un vol en formation. La figure 6.11 montre cette décomposition de la force \mathbf{M}_i .

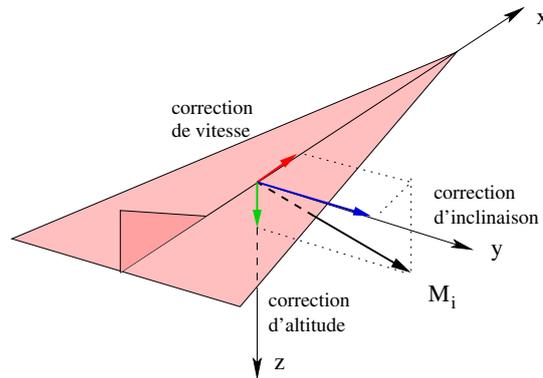


FIG. 6.11 – Décomposition de la force globale dans le repère avion pour le contrôle réactif.

6.3.3 Les communications dans la formation

Les études de stabilité {Swaroop et Hedrick, 1996; Pant *et al.*, 2002} montrent qu'il faut avoir des informations venant d'un maximum d'engins pour avoir une convergence rapide de la stabilité. De plus, dans un cas où la sélection de configuration se fait de façon centralisée, le responsable de la formation doit connaître la position de tous les avions pour établir la nouvelle configuration. L'objectif est donc d'avoir une diffusion permanente des informations de chaque avion vers tous les autres.

En cas de coupure momentanée des communications entre deux avions, l'impact sur la formation ne doit pas se faire sentir au niveau du contrôle, et peut se traduire par un retard éventuel au niveau de la sélection de la configuration, variable suivant les solutions retenues.

L'architecture physique d'un réseau de communication réel entre plusieurs avions en environnement hostile dépasse la portée de cette étude, mais reste néanmoins un problème majeur à résoudre pour garantir une robustesse et une qualité de service compatible avec ce type d'application.

Néanmoins, nous avons évalué la robustesse du contrôle de formation vis-à-vis des pertes de communication de la façon suivante : un groupe de quatre UAVs suit une trajectoire de référence

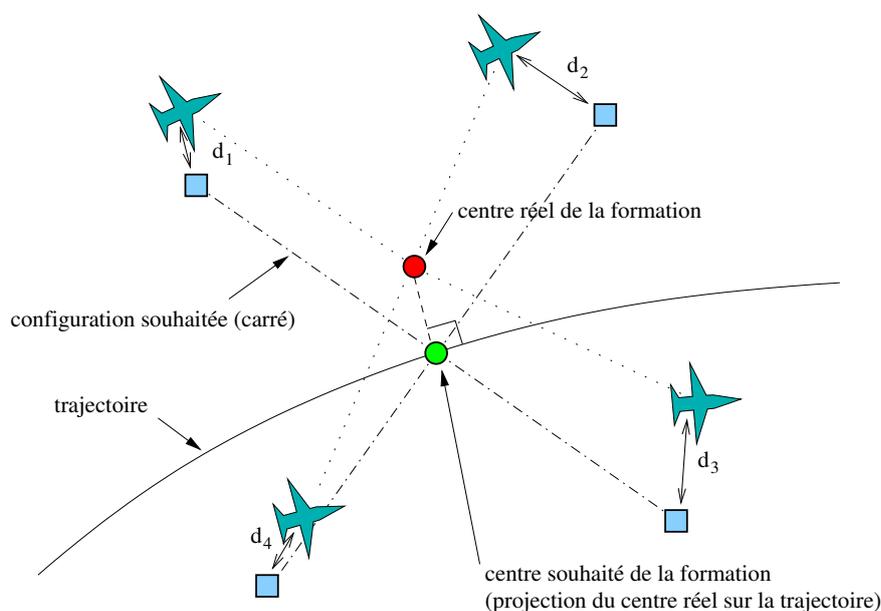


FIG. 6.12 – Mesure de l'écart par rapport à une configuration de référence.

avec une configuration fixe (en carré). L'écart d'un avion i est noté d_i et est déterminé comme indiqué sur la figure 6.12. L'écart moyen des avions par rapport à la configuration $e = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 d_i$ est enregistré tout au long de la trajectoire, avec, pour chaque simulation, un pourcentage donné de pertes aléatoires de messages. Le graphe de la figure 6.13 montre la valeur moyenne de e en fonction du pourcentage de perte de communication.

On peut constater que la formation reste stable jusqu'à environ 80% de pertes de communication. À partir de 90%, nous avons pu constater, lors de nos simulations, l'apparition de collisions entre les avions. À 95% de pertes, la formation n'est plus du tout capable d'assurer sa cohérence, ni sa sécurité. Une amélioration qui reste à évaluer est d'améliorer le traitement des données reçues pour éviter de produire des commandes de correction pouvant entraîner des collisions. Cela peut passer par une évaluation du pourcentage de pertes pour adapter les gains de correction en fonction de la qualité des transmissions. Un point important de ce test est qu'il n'y avait pas de synchronisation en temps au niveau des points de passage. L'asservissement sur la trajectoire n'est donc assuré que latéralement. La contrainte d'asservissement en temps, qui doit exister lors d'une mission planifiée, devrait améliorer la robustesse du système pour des pertes plus importantes de communications.

6.3.4 Performances de l'asservissement réactif

Dans cette section, nous étudions différents cas pour évaluer les performances de l'asservissement réactif. La composante d'évitement de collisions n'est donc pas active (la matrice de coefficients \mathbf{c} est nulle). À partir d'une configuration en carré suivant une trajectoire rectiligne,



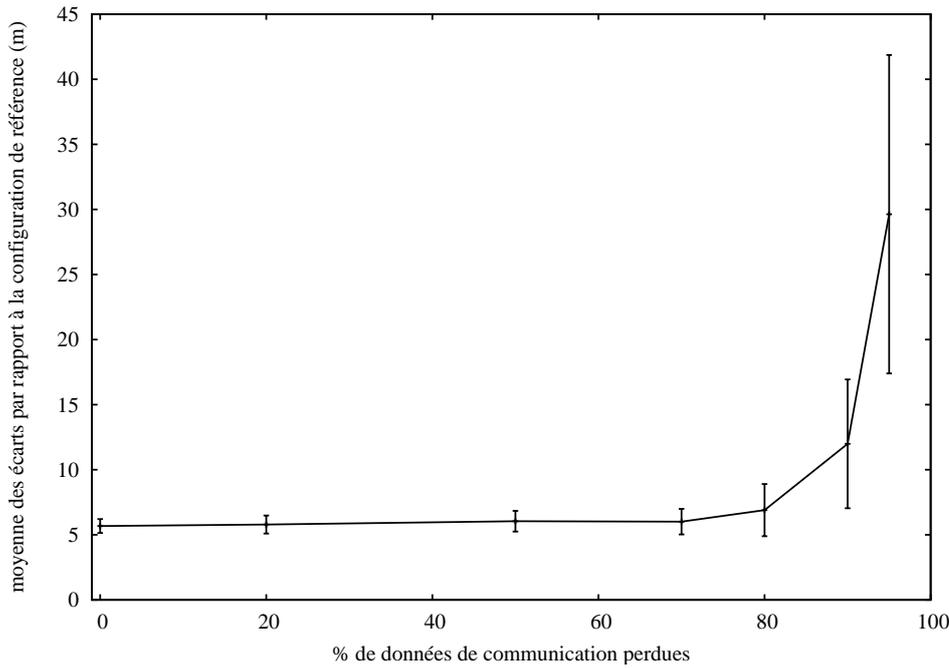


FIG. 6.13 – Robustesse du contrôle de formation aux pertes de communication.

deux situations sont proposées :

- l'un des *slots* est déplacé de 20 mètres dans l'axe de la trajectoire, puis revient à sa position d'origine après un certain temps (cas 1, 2 et 3) ;
- le même *slot* est déplacé de 20 mètres latéralement, puis revient à sa position d'origine (cas 4, 5, 6, 7 et 8).

Dans les figures suivantes, le déplacement du *slot* de l'UAV 2 est indiqué par un créneau en trait rouge plein. Les valeurs d'écart correspondent aux distances d_1 , d_2 , d_3 et d_4 comme définies sur la figure 6.12.

Le tableau suivant donne les différents coefficients des forces \mathbf{F}_i et \mathbf{S}_i dont nous allons étudier l'influence pour la première situation :

	α_a	β_a	γ_a	α_b	β_b	γ_b
Cas 1	3	0	1	0	0	0
Cas 2	3	0	1	3	0	1
Cas 3	3	0	1	9	0	3

Le cas 1 (figure 6.14) correspond à un asservissement uniquement avec la force proportionnelle. On constate de fortes oscillations, faiblement amorties, lors des déplacements du *slot* 2. De plus, les oscillations se répercutent sur tous les avions. Ce résultat est tout à fait normal pour les déplacements longitudinaux du fait de la structure de la force \mathbf{F}_i et du fait qu'il n'y a pas d'action du suivi de trajectoire (efficace uniquement en latéral).

Le cas 2 (figure 6.15) présente la même expérience, cette fois avec un amortissement dû à la force \mathbf{S}_i qui tend à égaliser les vecteurs vitesse dans la formation. On constate effectivement un temps de réponse bien meilleur et presque sans oscillation. La formation est d'ailleurs globalement beaucoup plus stable si l'on regarde l'allure des courbes avant le déplacement du *slot*.

Dans le cas 3 (figure 6.16), l'intensité de la force \mathbf{S}_i est augmentée et on constate que l'amortissement devient trop fort. Le temps de réponse est plus important. De plus, la force \mathbf{F}_i a du mal à réduire l'écart de certains avions, notamment pour l'UAV 4. Cela est probablement dû au fait que la contrainte d'égalisation des vitesses est devenue prépondérante.

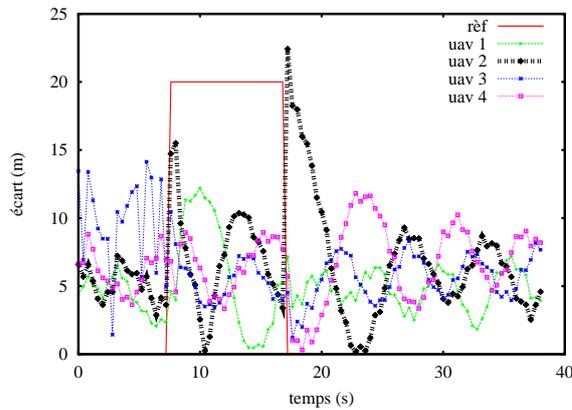


FIG. 6.14 – Cas 1.

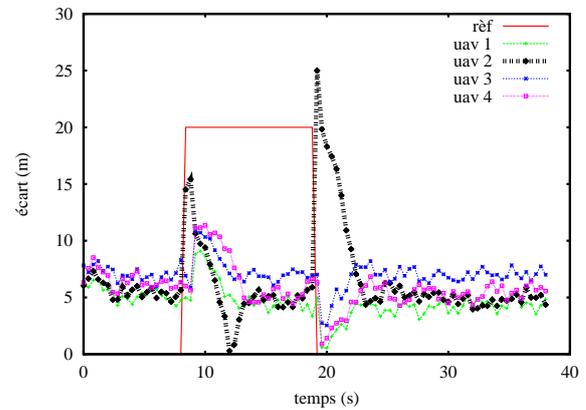


FIG. 6.15 – Cas 2.

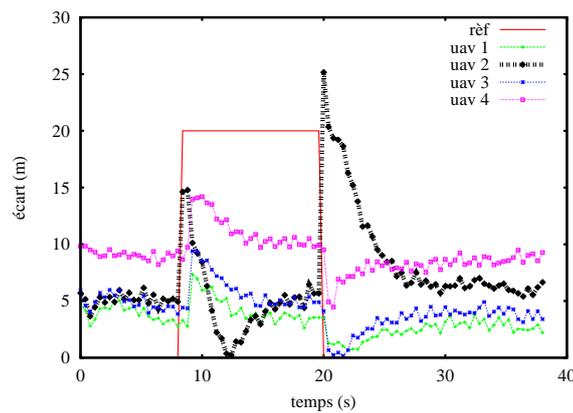


FIG. 6.16 – Cas 3.

Pour la seconde situation, les coefficients des forces \mathbf{F}_i et \mathbf{S}_i évalués sont :



	α_a	β_a	γ_a	α_b	β_b	γ_b
Cas 4	3	0	1	0	0	0
Cas 5	3	0.05	1	0	0	0
Cas 6	3	0	1	3	0	1
Cas 7	3	0.05	1	3	0.05	1
Cas 8	3	0.1	1	3	0.1	1

Le cas 4 (figure 6.17) correspond à un asservissement latéral, sans amortissement par \mathbf{S}_i , ni force latérale ($\beta_a = 0$), c'est-à-dire uniquement en se basant sur le suivi de trajectoire. On constate la présence d'oscillations lors du suivi de la consigne. D'une manière générale, le régime permanent est très perturbé (analogue au cas 1).

Dans le cas 5 (figure 6.18), une force latérale est ajoutée à \mathbf{F}_i . La réponse du système est plus rapide, mais le régime permanent, bien qu'un peu mieux stabilisé par rapport au cas 4, reste légèrement oscillant.

Le cas 6 (figure 6.19) est un asservissement latéral avec amortissement par la force \mathbf{S}_i , mais sans force latérale. Le régime permanent est correctement stabilisé, mais le temps de réponse reste un peu grand. De plus, il est intéressant de noter que le déplacement de l'UAV 2 n'a pratiquement pas d'influence sur les autres avions, contrairement à la situation longitudinale (cas 1 à 3).

Pour le cas 7 (figure 6.20), une force latérale a été ajoutée. Le temps de réponse est bien meilleur et la précision de placement des avions sur les *slots* est également améliorée. Par ailleurs, en se basant sur ces courbes, on peut dire que si tous les écarts sont en dessous d'un seuil (ici environ 10 mètres), la configuration de la formation est bien respectée.

Enfin, le cas 8 (figure 6.21), présente une situation où la force latérale devient trop importante, entraînant une diminution notable des performances du système en terme d'amortissement. Il est donc préférable d'avoir des gains trop faibles plutôt que trop forts, l'asservissement étant essentiellement assuré par le suivi de trajectoire.

Au final, le cas offrant les meilleures performances (pour notre modèle d'avion simulé) est le cas 7. On a également pu noter l'intérêt d'avoir des coefficients distincts pour les asservissements latéral et longitudinal.

6.4 Bilan

Ce chapitre a présenté les moyens d'exécuter les changements de configuration décidés par la couche de formation et d'assurer le bon contrôle des UAVs. Concernant l'asservissement des engins, la méthode choisie est relativement simple et nécessite le réglage de quelques coefficients. Une solution pour améliorer le temps de réponse du système serait d'utiliser une méthode de commande optimale, par exemple, calculée à partir des trajectoires individuelles des avions. Ces

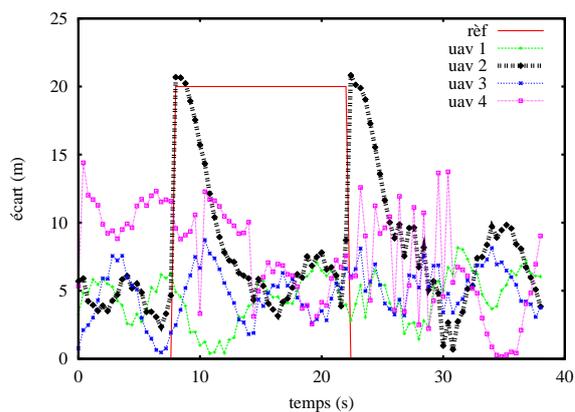


FIG. 6.17 – Cas 4.

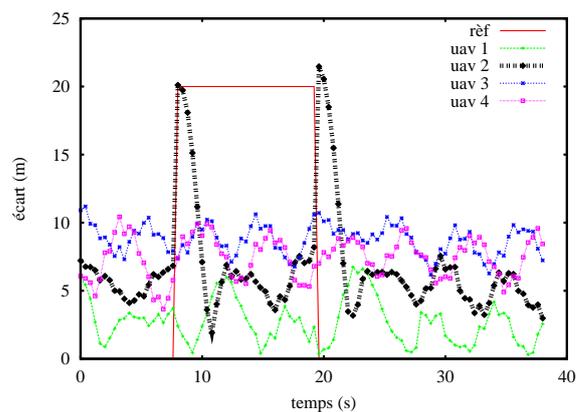


FIG. 6.18 – Cas 5.

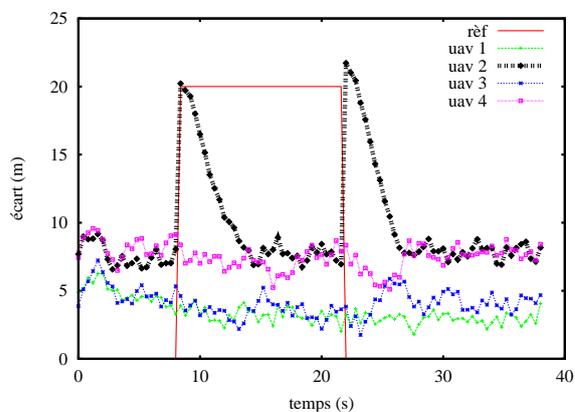


FIG. 6.19 – Cas 6.

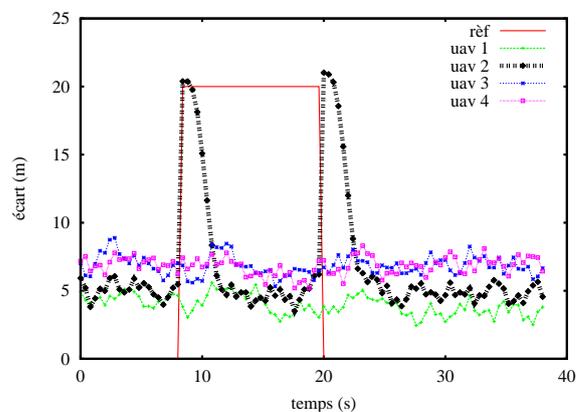


FIG. 6.20 – Cas 7.

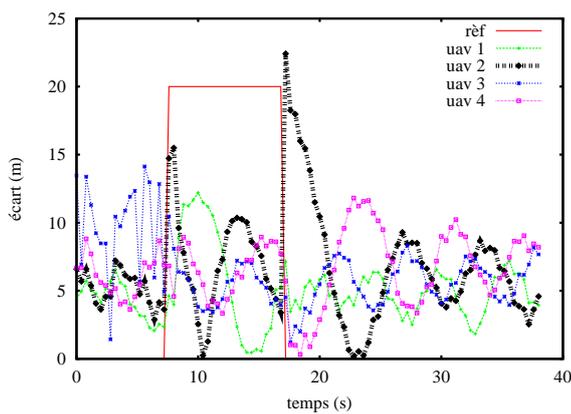


FIG. 6.21 – Cas 8.

dernières peuvent être construites en combinant la trajectoire de référence et les trajectoires de reconfiguration, avec un modèle des contraintes dynamiques des avions.

Le chapitre suivant regroupe les résultats d'expérimentations. Les simulations présentent des



scénarios élémentaires permettant d'observer les différents comportements du système, en mode *réactif*, *paramétrique* et *planifié*. Enfin, nous présentons les résultats d'expérimentations réelles sur des avions autonomes.

Chapitre 7

Expérimentations

CET CHAPITRE décrit l'implémentation qui a été réalisée de façon à mettre en œuvre les solutions et les algorithmes présentés dans les chapitres 4, 5 et 6. Nous présentons également des résultats obtenus en simulation ainsi que les expériences qui ont été menées sur des avions réels.

7.1 Implémentation

Notre système a été implémenté dans une bibliothèque C++, dans l'environnement de développement *JAFAR*. Cette bibliothèque, baptisée *RIDE*, a ensuite été intégrée à la couche fonctionnelle de l'architecture *LAAS* {Alami *et al.*, 1998a} dans le but d'être utilisée sur de vrais engins. La communication entre les avions, simulés ou réels, est réalisée par la bibliothèque *YARP* {Metta *et al.*, 2006}. Enfin, plusieurs interfaces logicielles (*drivers*) ont été développées pour contrôler le prototype *Lhassa* (figure 7.10), le système *Paparazzi* {Brisset *et al.*, 2006} ou le module de simulation.

7.1.1 Le module *RIDE*

La bibliothèque *RIDE*, codée en C++ dans l'environnement de développement interactif *JAFAR*⁴, regroupe toutes les fonctionnalités pour le contrôle autonome de la configuration, ainsi qu'une implémentation du contrôle distribué de la formation. Les principaux objets manipulés

⁴Voir la documentation : <http://www.laas.fr/~tlemaire/jafar>

par l'utilisateur sont la trajectoire, la formation et la configuration. Chacun de ces objets a une interface permettant l'ajout, la suppression ou la mise à jour des points de passage, des contraintes, des menaces et de l'état des avions.

7.1.2 L'architecture LAAS

L'architecture *LAAS* {Alami *et al.*, 1998a}, représentée figure 7.1 est une architecture hiérarchique hybride {Gat, 1991}.

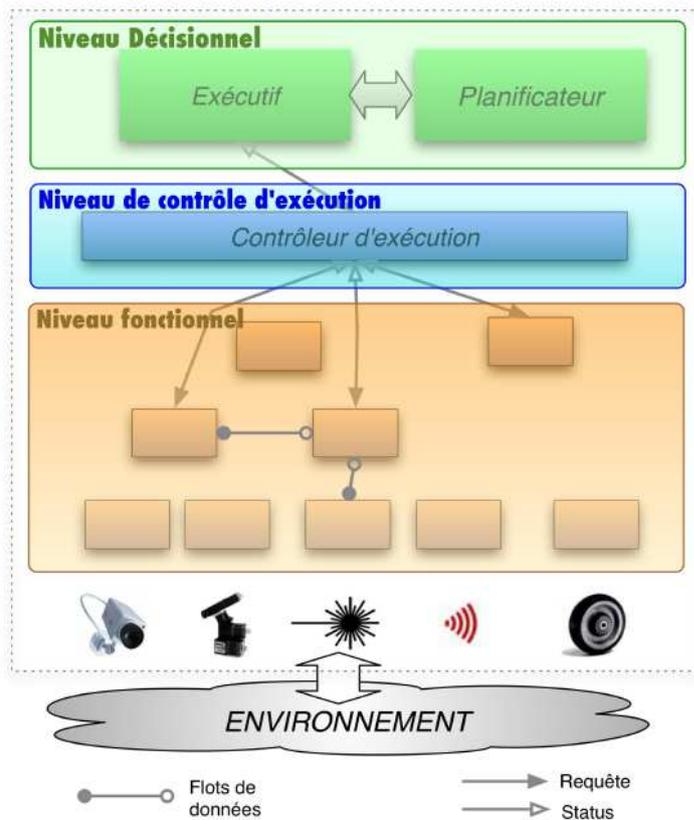


FIG. 7.1 – L'architecture *LAAS*.

Au plus près des aspects matériels, une couche fonctionnelle modulaire a la charge des processus de contrôle des capteurs et des effecteurs. Elle comprend également les algorithmes présents dans les boucles de traitement des données, dont les contraintes de fonctionnement sont le plus souvent très proches du temps-réel. L'environnement de développement $G^{en}oM$ {Fleury *et al.*, 1997} permet de définir et de produire les différents modules. Pour contrôler les avions, nous utilisons quatre modules $G^{en}oM$. Un module dédié au pilotage automatique (PILOT) est chargé de fusionner les consignes venant du module de navigation (NAV) et du module de vol en formation (RIDE) qui est l'interface $G^{en}oM$ de la bibliothèque *RIDE*. Les commandes sont envoyées vers le module d'interface avec les avions réels ou vers un module de simulation.

À un niveau intermédiaire, la couche de contrôle d'exécution est dédiée au contrôle des requêtes transmises à la couche fonctionnelle. Cette partie n'a pas été implémentée dans notre système, du fait de sa relative simplicité et de la présence de modes de sécurité efficaces pour les expérimentations réelles. Elle pourrait se révéler indispensable pour un engin intégrant toutes les fonctionnalités d'un véritable avion d'arme.

Au plus haut niveau, la couche décisionnelle rassemble les composantes permettant aux engins de planifier leurs actions et de superviser l'exécution des tâches. Les fonctions décisionnelles ont des contraintes temps-réel moins prononcées que les fonctions de la couche fonctionnelle. L'exécutif procédural *OpenPRS* {Ingrand *et al.*, 1996} est utilisé pour la supervision. Le *Message Passer* est un petit outil de communication qui permet aux noyaux *OpenPRS* et à des applications externes de communiquer entre eux. Un superviseur très simple, baptisé KASHAG (du nom du corps exécutif tibétain), et une interface graphique ont été implémentés pour permettre le contrôle de plusieurs avions. Pour le moment, les missions sont toutes définies par un opérateur et aucun planificateur n'a été intégré dans cette architecture.

Le résultat de cette implémentation est présenté sur la figure 7.2 et correspond à l'architecture introduite section 4.2.

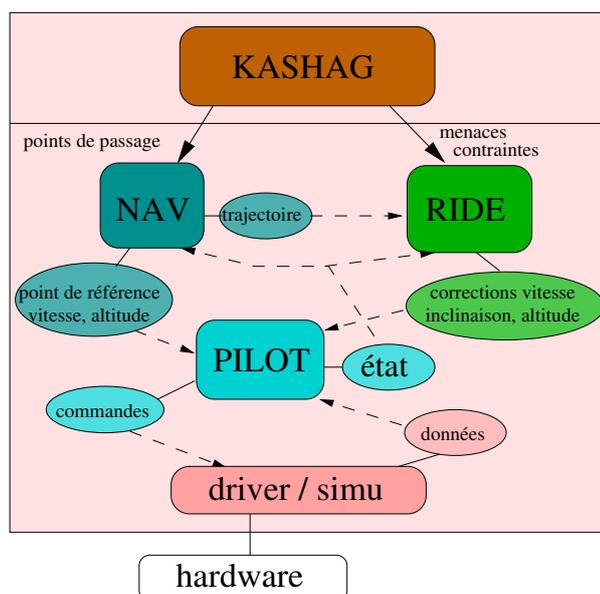


FIG. 7.2 – L'implémentation de l'architecture *LAAS*.

7.1.3 La communication avec *YARP*

La communication entre les drones est primordiale pour le contrôle du vol en formation. Pour une plus grande efficacité, les informations doivent être échangées directement au niveau des modules RIDE. Cette fonctionnalité n'étant pas actuellement intégrée à *G^{en}M*, nous nous



sommes appuyés sur la bibliothèque de communication *YARP* qui permet d'échanger des données de façon souple et indépendante du type de réseau.

Ainsi chaque engin ouvre un port de communication en réception pour chacun des avions de la formation et un port en émission pour envoyer son état vers les autres avions. De plus, un port en réception et un en émission (utilisé par le *leader* de la formation) sont ouverts pour échanger les informations sur la configuration et les ordres de brouillage.

La figure 7.3 présente l'implémentation de l'architecture *LAAS* qui a été réalisée, en incluant les liens de communication et les interfaces de contrôle et de visualisation.

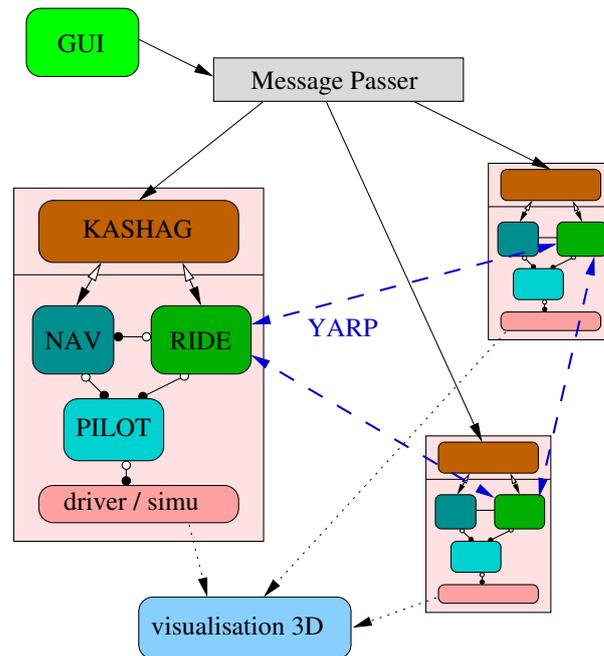


FIG. 7.3 – Les communications entre les engins dans notre architecture.

7.2 Résultats de simulation

Cette section présente des résultats de simulation pour des situations relativement simples, dont le but est de montrer le fonctionnement des différents éléments du système. Le modèle de vol et les performances des avions correspondent à ceux d'un avion de modélisme avec des vitesses de vol de 10 à 15 m/s. Les captures d'écrans viennent de l'affichage 3D sous GDHE {Herrb, 2007}. La grille au sol correspond à des carrés de 100 mètres de côté, et pour une meilleure visibilité, les avions sont grossis 10 fois. La distance minimale entre les UAVs, matérialisée par des cercles de couleur, est de 20 mètres. Le corridor, matérialisé par un cercle noir centré sur la trajectoire, est de 100 mètres. Les portées des radars vont de 400 à 800 mètres environ. Les animations complètes sont disponibles à l'adresse <http://www.laas.fr/~ghattenb/index.php?page=thesis>.

7.2.1 Le support mutuel

La situation présentée dans cette simulation est très simple : deux UAVs passent à portée d'une poursuite de tir. On peut observer l'évolution de la position des deux *slots* soumis au champ de potentiel. La figure 7.4 montre les avions à deux étapes différentes : l'un des UAVs (le rouge) reste bien protégé par le brouillage de l'autre (le vert), matérialisé par une ligne verte entre la menace et l'avion.

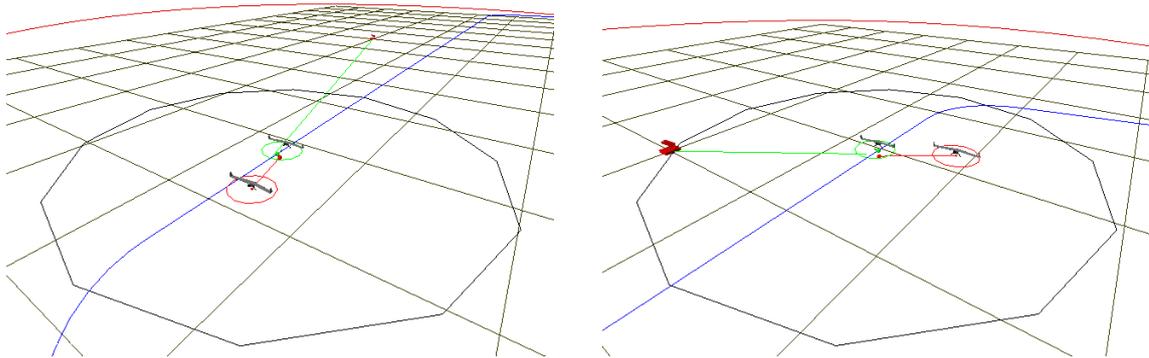


FIG. 7.4 – Simulation de support entre deux UAVs pour le brouillage défensif.

Lorsque le nombre de menaces et d'UAVs augmente, il n'est pas toujours possible d'assurer la protection de tous les avions à cause des limitations du brouillage défensif (voir § 3.4.3). Dans une situation avec 4 menaces et 4 UAVs, nous avons enregistré le nombre d'avions qui ne sont pas protégés. Le nombre maximal est égal au produit du nombre d'avions par le nombre de menaces, soit 16 dans notre cas. Trois cas sont étudiés :

- le système gère la position des slots et les commandes de brouillage (auto) ;
- le système gère le brouillage, mais ne change pas la configuration (fixe) ;
- les avions sont indépendants, ils brouillent la menace la plus proche et la configuration est fixe (indépendant).

Le résultat est présenté figure 7.5. On constate que le mode complètement automatique améliore sensiblement la protection de la formation. De plus, le simple fait d'allouer les brouilleurs défensifs en tenant compte des autres avions suffit à réduire l'exposition de la formation. Ces courbes sont cependant à prendre avec précaution. En effet, le comportement des menaces n'est pas très réaliste : on suppose ici qu'un avion est détecté par une menace dès qu'il n'est plus protégé (avec des critères très stricts) et qu'il n'y a pas de « réponse » des radars (départ de missiles). Dans une modélisation plus réaliste de l'environnement, les avions n'activent leurs brouilleurs que s'ils sont effectivement en train d'être « accrochés » par le radar. Les choix de brouillage présentés correspondent à une situation par défaut : lorsque les avions ne sont pas encore détectés, ils se préparent à brouiller le radar le plus menaçant (ici, le plus proche) en



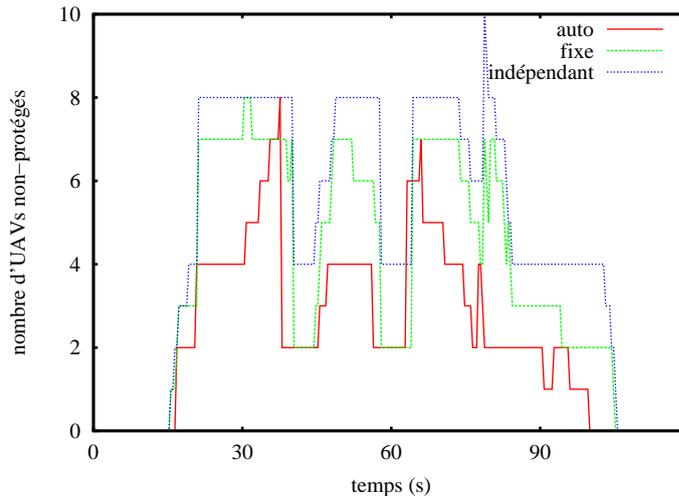


FIG. 7.5 – Comparaison de l'efficacité du brouillage défensif.

tenant compte des possibilités de support mutuel.

Au final, si l'utilisation des champs de potentiels apporte une petite amélioration, c'est en travaillant sur l'allocation des brouilleurs défensifs et en prenant en compte un modèle plus précis pour le comportement des menaces que l'on va pouvoir mieux protéger la formation.

7.2.2 La protection contre les radars de veille

Afin d'observer le comportement du système pour la protection contre les radars de veille, nous plaçons la formation sur une trajectoire à portée de quatre menaces. La situation est présentée en haut à gauche sur la figure 7.6. Une série d'images est prise aux positions indiquées sur la trajectoire. La formation est constituée de quatre avions, dont un brouilleur offensif (l'avion jaune).

Sur l'image 1, on peut voir le *BO* en position paramétrique pour protéger la formation contre les radars 1, 2 et 3. L'ouverture maximale est ici limitée à 120° . Ainsi, sur l'image 2, on constate que seules les menaces 1 et 2 sont brouillées. En effet, l'angle formé par la formation et les menaces 1 et 3 dépasse la valeur limite. À plus forte raison, il n'est pas possible de se protéger à la fois des menaces 1 et 4.

À la position de l'image 3, il est de nouveau possible de brouiller les menaces 1, 2 et 3. Cependant, il reste le cas du radar numéro 4 que l'on peut voir sur l'image 4. Ce dernier ne pourra être traité par le brouilleur offensif qu'une fois la formation hors de portée du radar 1. Sur l'image 5, on peut constater que les UAVs sont maintenant protégés contre les menaces 2, 3 et 4.

Au cours de cette simulation, une fois le *BO* à sa position paramétrique (avant l'image 1),

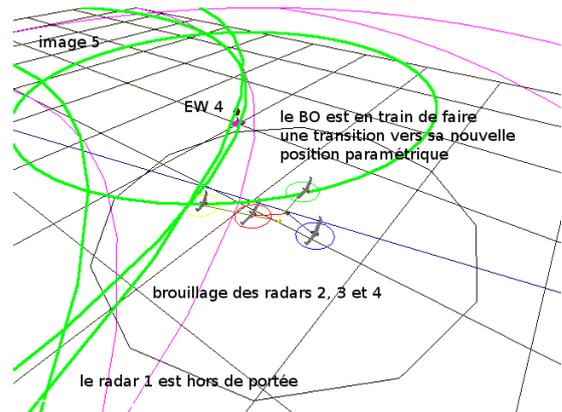
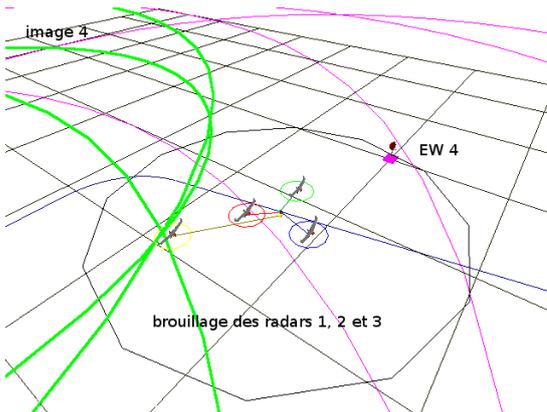
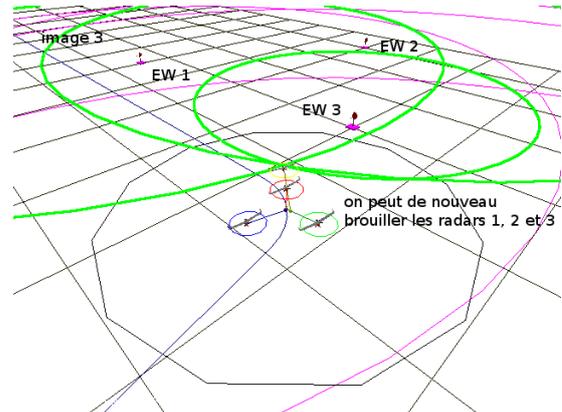
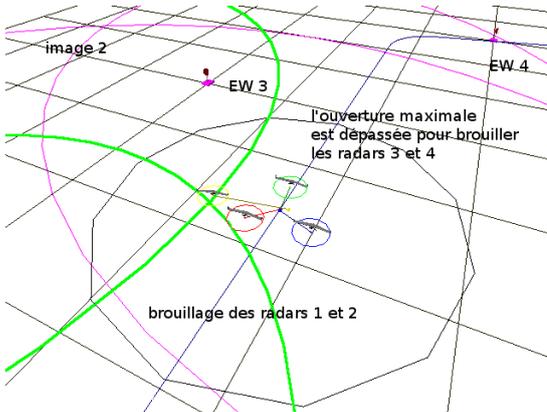
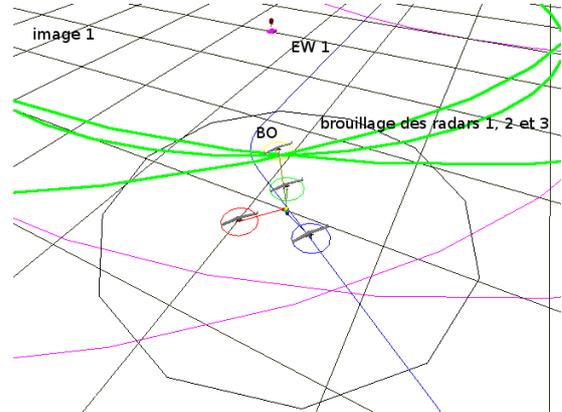
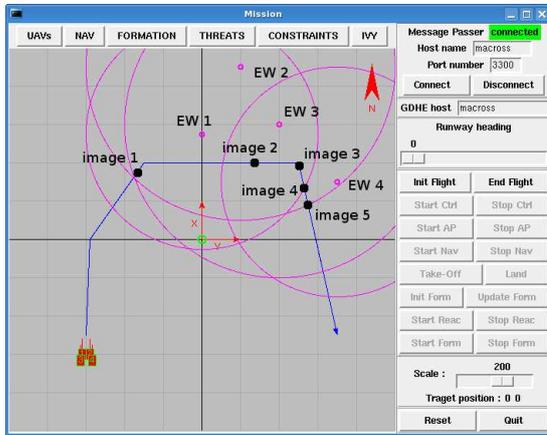


FIG. 7.6 – Simulation pour le brouillage offensif.



aucune manœuvre de reconfiguration n'a été nécessaire pour placer le brouilleur sur son slot. En particulier entre les images 4 et 5, les positions paramétriques sont relativement différentes. Une transition douce entre l'allocation (1,2,3) et l'allocation (2,3,4) a permis d'éviter d'avoir à planifier, tout en assurant la protection de la formation.

Enfin, pour ce scénario, un second brouilleur offensif aurait été suffisant pour assurer une protection complète de la formation tout au long de la trajectoire.

7.2.3 La reconfiguration

Dans cette simulation, nous présentons l'exécution de trajectoires de reconfiguration pour une formation de quatre UAVs. La situation est identique à celle de la figure 7.6, où seul le radar de veille numéro 4 est présent. La planification des déplacements est déclenchée par l'arrivée de la formation à portée du radar, avec une distance d'anticipation de 300 mètres. Le résultat de la simulation est présenté par les images de la figure 7.7. L'avion jaune est le brouilleur offensif.

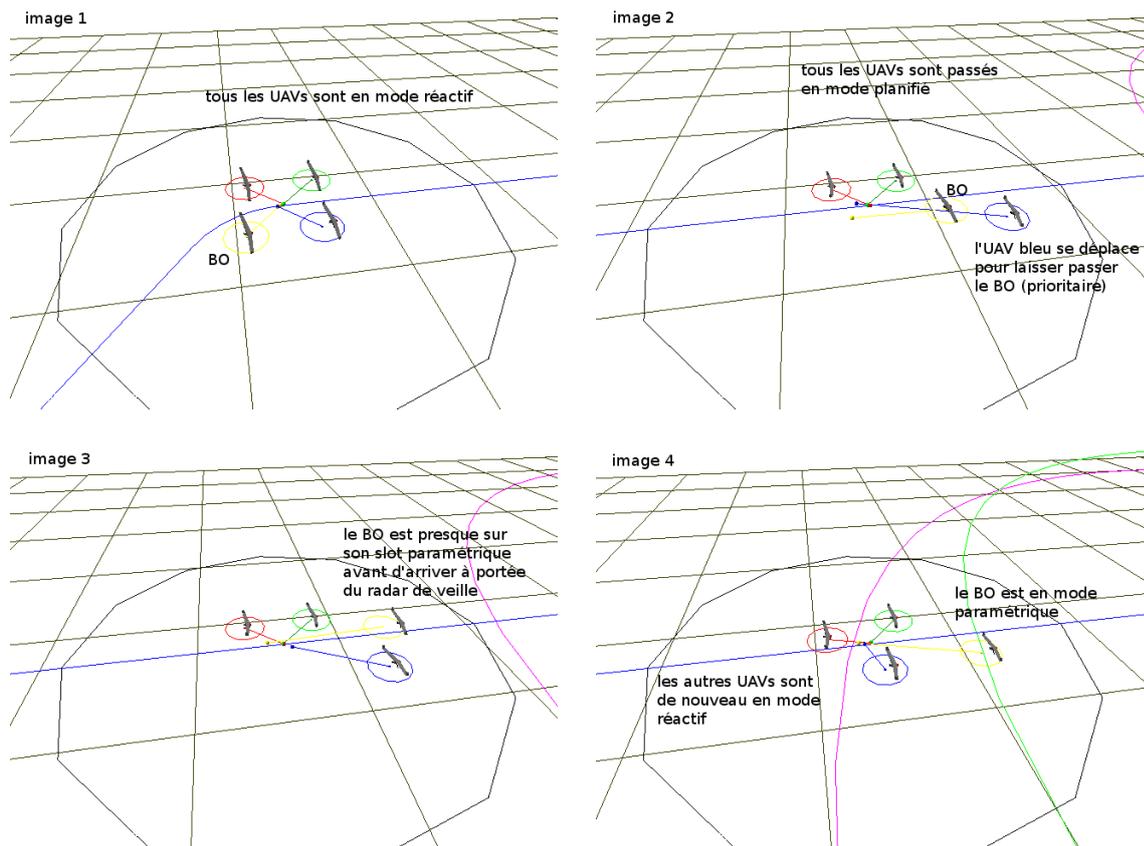


FIG. 7.7 – Exécution des trajectoires de reconfiguration en simulation.

Sur l'image 1, tous les avions sont en mode réactif. On constate que le *BO* se trouve du mauvais côté de la formation et va devoir la traverser pour se placer sur son *slot* paramétrique.

C'est ce que l'on peut voir sur l'image 2. À cet instant, le *BO* est en train de rejoindre sa position de brouillage. L'avion bleu, qui se trouve sur sa trajectoire, s'est écarté puisqu'il n'est pas prioritaire. On peut remarquer que le déplacement de cet avion se fait vers l'avant, ce qui l'expose davantage qu'un déplacement sur le côté, au cas où la formation arriverait plus tôt que prévu à portée du radar. Ce paramètre ne peut pas, pour le moment, être pris en compte, puisque le calcul des trajectoires de reconfiguration se fait sans la connaissance de la trajectoire globale, ni des menaces. Ce point est à investiguer pour des travaux futurs.

À l'image 3, la formation a presque terminé sa reconfiguration, juste avant d'arriver à portée du radar de veille. Ainsi, la formation est bien protégée lorsque les avions repassent en modes paramétrique et réactif (correspondant à l'image 4).

7.2.4 Simulation pour de grandes formations

Nous avons également testé notre système dans le cas limite, c'est-à-dire pour huit UAVs. Comme prévu, la planification des trajectoires de reconfiguration utilise toutes les ressources de calcul du *leader*. Nous avons pu constater que l'exécution de ces trajectoires était généralement plus longue pour un même nombre de pas de reconfiguration. Cela vient du fait qu'il est plus difficile d'avoir tous les avions synchronisés sur leur *slot* en même temps comme montré sur la figure 7.8. Les performances du système sont visiblement dégradées. Au delà des capacités de calcul, le comportement de la formation dans cette configuration nous conforte dans le choix de limiter la taille des groupes d'UAVs. À partir d'une certaine taille, la sécurité de la formation est trop difficile à assurer.

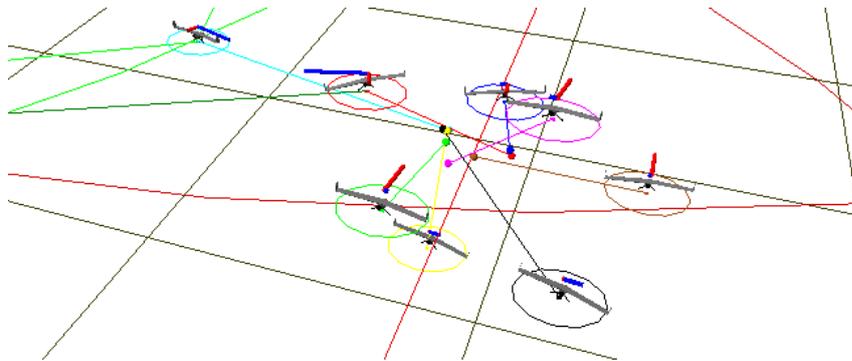


FIG. 7.8 – Simulation avec une formation à 8 UAVs.

7.2.5 Simulations dans un environnement réaliste

Les cas qui viennent d'être présentés correspondent à des situations élémentaires, sans mission ni interactions entre les avions et les menaces. L'environnement simulation Artemis (figure 7.9) de *Dassault Aviation* doit permettre à terme d'évaluer ces algorithmes dans des situations réalistes,



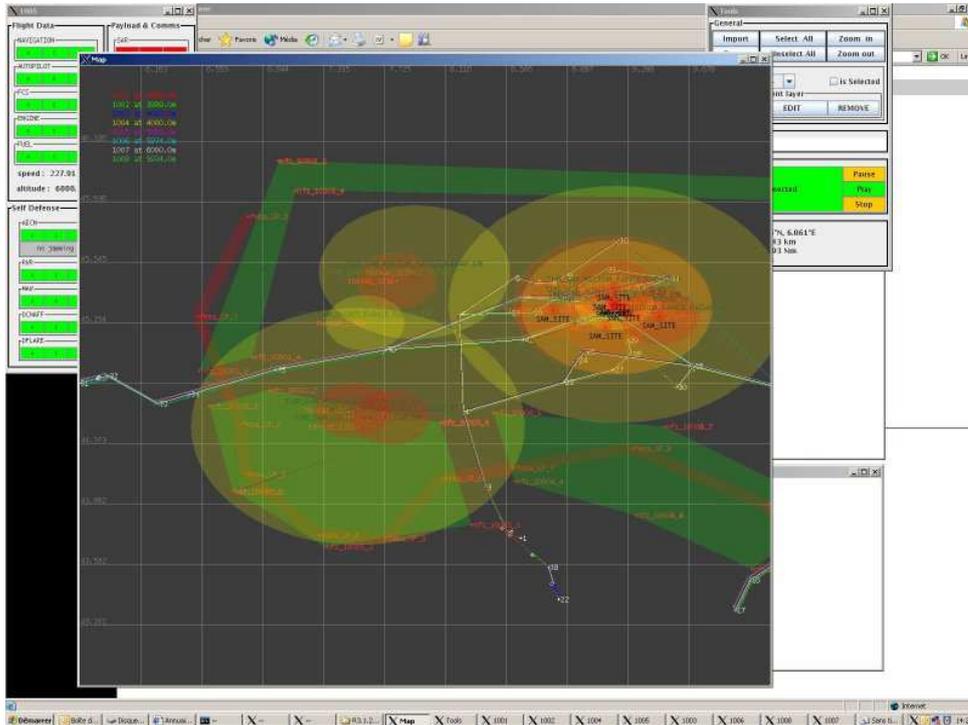


FIG. 7.9 – L’interface graphique du simulateur Artemis. Deux groupes de deux UAVs attaquent une cible par le sud et l’ouest.

et avec un lien vers un système de planification de mission {Baltié *et al.*, 2007}. La mise en œuvre du module *RIDE* dans Artemis est actuellement en cours.

7.3 Expérimentations réelles

7.3.1 Présentation

Les premières expérimentations étaient initialement prévues sur le prototype baptisé *Lhasa* (figure 7.10) et construit par la société LLM. À la suite de nombreux retards et difficultés techniques (qui furent fatales à l’avion et plus encore à sa charge utile), nous nous sommes portés vers une solution plus simple et plus rapide à mettre en œuvre. Ainsi, nous avons monté des petits avions de modélisme *Minimag* commercialisés par la société *Multiplex* et équipés d’une électronique de bord *Paparazzi* (voir Annexe A).

Ces engins, baptisés *Nirvana*, sont beaucoup plus petits et n’ont donc pas de capacité de charge utile autre que les capteurs et l’électronique de navigation. En particulier, les ressources de calculs embarqués ne permettent pas de faire tourner les algorithmes de la couche de formation à bord des avions. Cependant, l’architecture très souple du système *Paparazzi* permet de faire ces traitements au sol et d’envoyer les consignes de navigation sortant du module PILOT directement

vers les avions. Les trois avions *Nirvana* sont par la suite dénommés N1, N2 et N3.



FIG. 7.10 – Le prototype *Lhasa*.



FIG. 7.11 – Les deux premiers avions *Nirvana* N1 et N2 équipés du système *Paparazzi*.

Nous avons proposé quatre expérimentations incrémentales :

- faire suivre une trajectoire à un groupe d’avions dans une configuration fixe ;
- au cours du vol le long de la trajectoire, imposer de petites modifications dans la configuration ;
- suivre une trajectoire avec gestion autonome de la configuration uniquement en mode réactif (présence de poursuites de tir) ;
- réaliser un scénario complet avec des placements paramétriques et réactifs, et la possibilité d’une reconfiguration planifiée.

7.3.2 Résultats

Lors de notre première phase d’expérimentation, nous avons fait voler deux avions en même temps le long d’une trajectoire de référence. La procédure de mise en formation n’est pas encore automatisée. Le plan de vol est donc le suivant : chaque avion, guidé par le système *Paparazzi*, se place sur un cercle d’attente, puis ils sont envoyés simultanément sur des segments parallèles, permettant aux commandes venant des modules G^{en}M de prendre le relai sur le plan de vol géré par *Paparazzi*.

Ces premiers vols ont permis d’ajuster les coefficients pour l’asservissement de la formation. Pour le premier essai, les coefficients étaient :

	α_a	β_a	γ_a	α_b	β_b	γ_b
Essai 1	0,3	0	1	0,3	0	1



Les écarts par rapport à la configuration de consigne, enregistrés pendant le vol (figure 7.12), montrent que la formation est stable, mais que la précision est assez médiocre, avec de fortes oscillations. L'une des raisons de ce mauvais résultat est un coefficient vertical γ bien trop fort. On peut voir sur la photo de la figure 7.13 que les avions subissent de fortes variations d'assiette et ils ont donc plus de mal à tenir l'altitude.

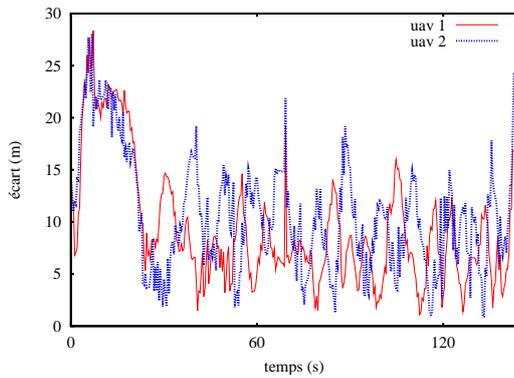


FIG. 7.12 – Les écarts enregistrés lors du premier vol.



FIG. 7.13 – Les avions N1 et N2 pour leur premier vol en formation.

Les vols suivants ont permis d'affiner les réglages. Dans une situation similaire, nous présentons figures 7.14 et 7.15 les mesures d'écarts dans deux cas : sans force latérale, puis avec (la force latérale, décrite § 6.3.2, permet d'améliorer la précision et la rapidité du système, mais peut entraîner des oscillations).

	α_a	β_a	γ_a	α_b	β_b	γ_b
Essai 2	0,5	0	0,1	0,5	0	0,1
Essai 3	0,5	0,02	0,1	0,5	0,02	0,1

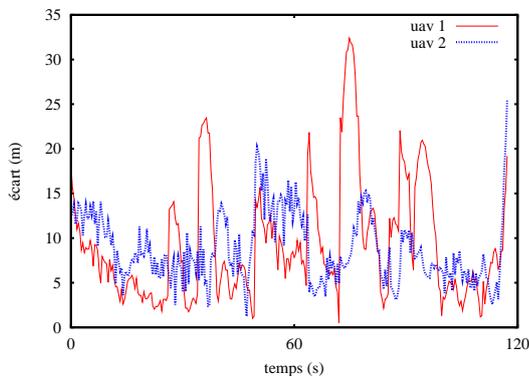


FIG. 7.14 – Les écarts enregistrés, sans force latérale et avec des changements manuels de configuration.

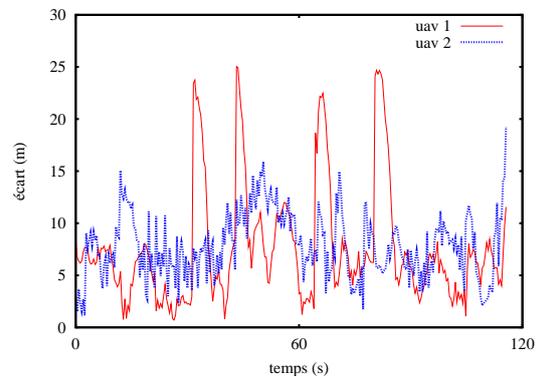


FIG. 7.15 – Écarts enregistrés avec force latérale.

De plus, au cours de ces deux vols, nous avons effectué des changements manuels dans la configuration en déplaçant le *slot* de l'avion 1. Il y a sept changements dans l'essai de la figure 7.14 et quatre dans celui de la figure 7.15. Les premières constatations que l'on peut faire sur ces deux figures sont que la précision s'est bien améliorée, avec des écarts plus petits et moins d'oscillations. Ensuite, l'ajout d'une force latérale améliore sensiblement les performances du système. Cependant, les avions réels sont très sensibles à ce paramètre qui peut faire entrer les avions dans des oscillations importantes allant jusqu'à rendre instable la formation (l'un des avions risquant de faire un demi-tour).

Les changements de configurations réalisés pendant ces vols correspondent à des déplacements d'environ 20 à 30 mètres du *slot* de l'avion 1, aussi bien en latéral qu'en longitudinal. On constate que le temps de réponse de la formation ne dépasse pas la dizaine de secondes. De plus, les écarts arrivent à se stabiliser en dessous de la barre des 10 mètres, notamment avec l'action d'une force latérale. On doit donc pouvoir utiliser ce seuil pour des phases de reconfiguration automatique et l'exécution des trajectoires de reconfiguration.

Le dernier vol que nous avons réalisé a mis en œuvre les trois avions pour un vol en formation sans force latérale, ni changements de configuration. Les écarts mesurés sont présentés sur la figure 7.16. On constate que la précision est beaucoup moins bonne que pour les essais avec deux avions. Une explication est que l'avion numéro 3 avait pour ce vol de grandes difficultés à suivre les consignes de navigation. C'est ce que l'on peut voir avec ce gros retard lors de la mise en formation. D'autres vols seront nécessaires pour déterminer si ces résultats sont essentiellement dus à des problèmes techniques, ou si les performances sont simplement dégradées par l'ajout d'un troisième avion. La figure 7.17 montre les trajectoires en 3D des avions pour l'intégralité du vol (2 passages en formation). En observant les cercles d'attente au début de la mission, on voit bien qu'un des avions a eu des difficultés à maintenir sa position.

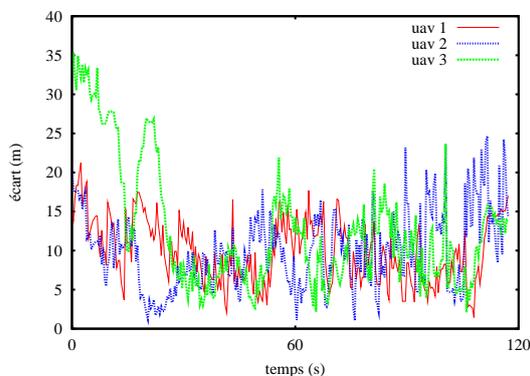


FIG. 7.16 – Les écarts enregistrés pour une formation de 3 UAVs.

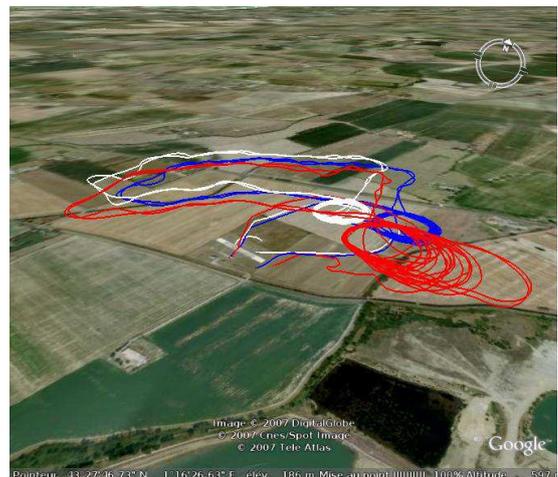


FIG. 7.17 – La visualisation des trajectoires en 3D.



7.4 Bilan

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble d'expérimentations, en simulation ou réelles, dans l'objectif d'évaluer les performances des algorithmes développés dans les chapitres précédents. Les premiers résultats sont convaincants, pourtant, nous devons les compléter afin de les confronter à des missions plus réalistes d'une part, et aux contraintes des expérimentations réelles d'autre part.



FIG. 7.18 – Trois avions en formation.

Conclusion et perspectives

Dans ce rapport, nous avons abordé le thème de la gestion autonome de la configuration d'une flotte de drones volant en formation, dans un environnement hostile. Nous avons proposé une méthode mettant en place une couche de contrôle intermédiaire dédiée à la formation. Elle permet de faire le lien entre les niveaux décisionnels et fonctionnels. Un ensemble d'algorithmes a également été développé pour cette application. Ils permettent de mener à bien l'ensemble des tâches associées à la gestion d'une formation. Cette solution a été évaluée aussi bien par des simulations que par des expérimentations en environnement réel.

Dans un premier temps, nous avons présenté la problématique du vol en formation, ainsi que les différentes notions et stratégies de commandes qui y sont liées. Puis, nous avons posé précisément le contexte de cette étude, à savoir les opérations militaires mettant en œuvre des groupes de drones de combat, ainsi que la modélisation des éléments de l'environnement, c'est-à-dire les menaces, les avions avec leurs systèmes d'armes, de détection et de protection.

À partir de cette description des missions et de cette modélisation, nous avons identifié le besoin d'une couche de contrôle dédiée à la gestion de la configuration interne d'une formation. L'objectif est d'améliorer l'efficacité du groupe d'avions en s'adaptant à l'environnement, notamment la présence de menaces, et en utilisant au mieux les dispositifs de protection et de brouillage. Pour chacune des étapes, les algorithmes ont été développés de façon à répondre aux spécifications en terme de dimension du problème à traiter et en terme de temps de calcul, pour être embarqués sur des robots réels. Nous nous sommes portés vers des solutions de recherche de graphe, basées sur les algorithmes *Branch & Bound* et A^* . Ainsi, notre système est capable de suivre une trajectoire de référence en assurant un espacement minimal entre les engins, une empreinte au sol réduite et il permet de réaliser des reconfigurations complexes dans la formation en exploitant les trois dimensions.

Afin de réaliser des expérimentations, aussi bien simulées que réelles, un contrôle de formation a été implémenté. La robustesse de cette solution a été testée vis-à-vis des pertes occasionnelles

de communication.

Pour la suite de nos travaux, il serait intéressant de mettre l'accent sur les interactions entre notre couche de formation et un système de planification de missions afin d'exploiter au mieux les fonctionnalités de ces deux niveaux. En particulier, il est important d'informer le plus tôt possible les niveaux décisionnels de la capacité, ou non, à traiter toutes les menaces et ainsi assurer la protection de la formation. De plus, l'intégration de ce système dans une architecture de simulation complète permettrait d'avoir une évaluation précise des bénéfices liés à la gestion intelligente de la configuration, au travers de scénarios complexes et réalistes.

Plusieurs réorganisations sont également possibles. Tout d'abord en distribuant la gestion de la configuration entre les avions de façon à comparer la robustesse et l'efficacité par rapport à la solution centralisée que nous avons proposée. Ensuite, nous ne tenons pas compte pour le moment du relief pour la protection de la formation. Pour être efficace et exploiter le terrain, il faut que la couche de formation puisse remettre en cause les points de passage fournis par la planification de mission, ou au moins avoir la possibilité d'ajouter des points intermédiaires. Cette modification sur la trajectoire globale de la formation pouvant avoir un impact sur les ressources, et donc sur la mission, la coopération entre niveaux décisionnels et formation est primordiale, ce qui rejoint le point évoqué plus haut.

Les problèmes de synchronisation entre équipes pourraient également être traités par la couche de formation, en complémentarité du module de navigation. Cela permettrait notamment de simplifier la gestion des regroupements du point de vue de la planification de missions. Cette problématique se présente également à la fin des phases d'attaque où les avions peuvent être amenés à suivre des trajectoires très différentes pour mener à bien leurs frappes.

Enfin, l'expérimentation reste une étape indispensable pour valider une approche. Dans notre contexte de missions militaires, nous devons améliorer ou développer des outils permettant d'inclure de nouveaux éléments simulés dans l'environnement réel. Ainsi, il serait possible d'améliorer la modélisation des menaces, des radars, des cibles et des interactions entre les différents éléments, puis de prendre en compte ces nouveaux paramètres dans la gestion de la configuration.

Annexe A

Le système *Paparazzi*

Le système *Paparazzi* {Brisset *et al.*, 2006} est un projet *open-source*, démarré en 2003, visant à développer un pilote automatique pour des engins autonomes de faible coût. Aujourd'hui, il est implémenté par plusieurs équipes à travers le monde et pour des cellules nombreuses et variées. Le système se compose d'une carte embarquée avec processeur et capteurs associés, d'un logiciel de contrôle de vol et de navigation, d'une interface graphique pour la station sol, d'un protocole de communication reliant les différents composants et d'un environnement de simulation (voir figure A.1). Il a été conçu pour s'adapter facilement à tout type de véhicules, aussi bien à ailes fixes qu'à voilure tournante. La sécurité étant au centre des préoccupations, il existe plusieurs modes de contrôle et différents modes de sécurité. Enfin, le code source et les schémas du matériel sont diffusés⁵ sous la licence *GNU Public License* et sont ainsi librement adaptables.



FIG. A.1 – Les différents composants du système *Paparazzi*.

⁵<http://www.recherche.enac.fr/paparazzi>

A.1 Hardware

Plusieurs versions de la carte ont été développées autour des micro-contrôleurs Atmel AVR et Philips ARM7 LPC. Les modèles actuels sont basés sur un processeur (modèle *tiny*, figure A.2) ou deux (modèle *classiX*). Chaque carte dispose de sorties pour contrôler des actionneurs, des entrées pour des capteurs, un récepteur de radio-commande (R/C) et un modem radio.

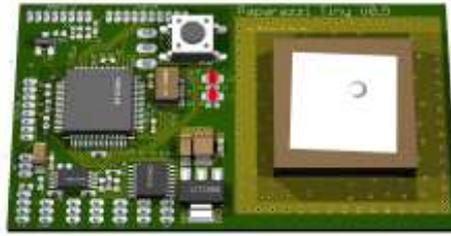


FIG. A.2 – La carte de contrôle *tiny* avec son GPS.

Un effort a également été fait pour disposer de capteurs bon marché, mais suffisamment efficaces pour assurer le contrôle et la sécurité du vol.

Capteurs infrarouges L'auto-pilote *Paparazzi* utilise des thermopiles (figure A.3) pour estimer l'attitude de l'avion en mesurant la différence de température comme le montre la figure A.4. La bande passante des capteurs infrarouges est limitée, mais suffisante pour des avions lents.

Gyroscope Pour des avions avec des dynamiques plus rapides, il est possible d'améliorer la stabilité en ajoutant un gyroscope sur l'axe de roulis.

Récepteur GPS La position globale de l'avion est fournie par un récepteur GPS, ainsi que le cap, la vitesse et l'altitude.

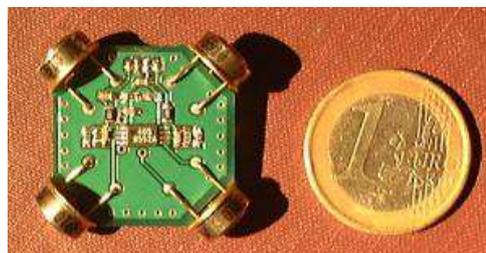


FIG. A.3 – Le capteur infrarouge horizontal 2 axes.

La figure A.5 montre l'intégration des différents composants dans un avion de modélisme classique :

A Carte de contrôle *Paparazzi* ;

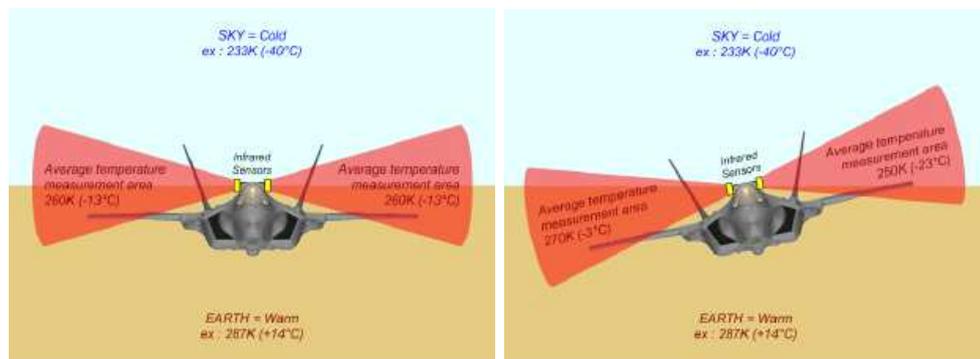
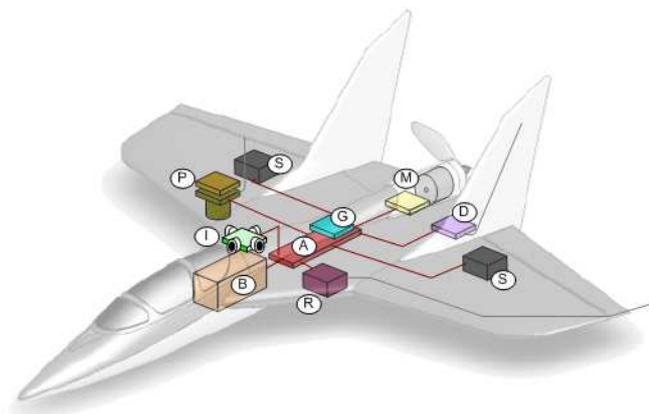


FIG. A.4 – Principe de mesure de l'angle par les capteurs infrarouges.

- B Batteries ;
- D Liaison de données radio (modem et antenne) ;
- G Récepteur GPS ;
- I Capteurs infrarouges ;
- M Moteur et contrôleur ;
- R Récepteur radio commande ;
- S Servo-moteurs ;
- P Charge utile (caméra...).

FIG. A.5 – Un avion équipé du système *Paparazzi*.

A.2 Software

Au niveau logiciel, l'auto-pilote réalise une boucle classique d'acquisition des données, estimation de l'état et production de la commande. Pour ce dernier point, il existe trois boucles



de contrôle présentées figure A.6. La première boucle assure la stabilisation de l'appareil et le contrôle de l'attitude. La deuxième boucle est un contrôle en cap, en altitude ou en position. La troisième boucle gère le plan de vol et surveille les différents paramètres (niveau de batterie, distance aux points de passage, distance de sécurité. . .).

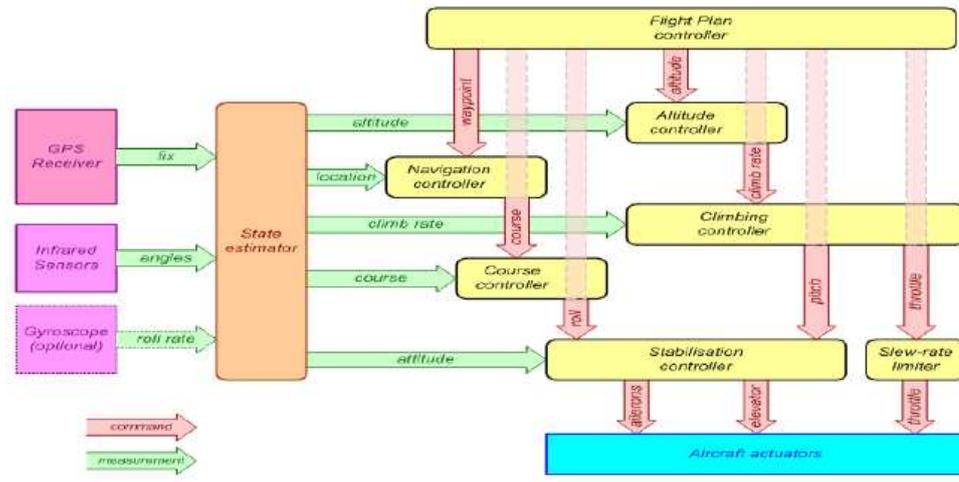


FIG. A.6 – Les boucles de contrôle de *Paparazzi*.

Une interface graphique (figure A.7) permet de contrôler les plans de vol de plusieurs avions simultanément. Il est également possible d'avoir accès aux différents éléments de télé-mesure et au retour vidéo d'une caméra si l'avion en est équipé. L'écran principal permet d'avoir une lecture rapide de la position des engins et de leur destination courante. L'interface est particulièrement utile pour le réglage en ligne des différents gains du système.

La figure A.8 présente l'architecture logiciel du système *Paparazzi*. Les principaux éléments sont :

Link C'est l'agent qui assure la communication avec les avions en gérant les périphériques matériels (modem radio). Plusieurs agents peuvent être utilisés en même temps et plusieurs avions peuvent être gérés par un agent.

Server Le serveur est responsable de l'enregistrement des messages et de leur transfert vers les agents concernés.

GCS C'est l'interface graphique de la station sol.

Tous ces agents communiquent entre eux par l'intermédiaire d'un bus de communication logiciel, baptisé *Ivy*⁶. Il s'agit d'une simple couche de communication au dessus du réseau IP, disponible dans de nombreux langages de programmation et qui permet de connecter facilement d'autres agents. C'est via ce bus que nous pouvons intégrer l'architecture *LAAS* dans le système *Paparazzi*.

⁶<http://www.tls.cena.fr/products/ivy>

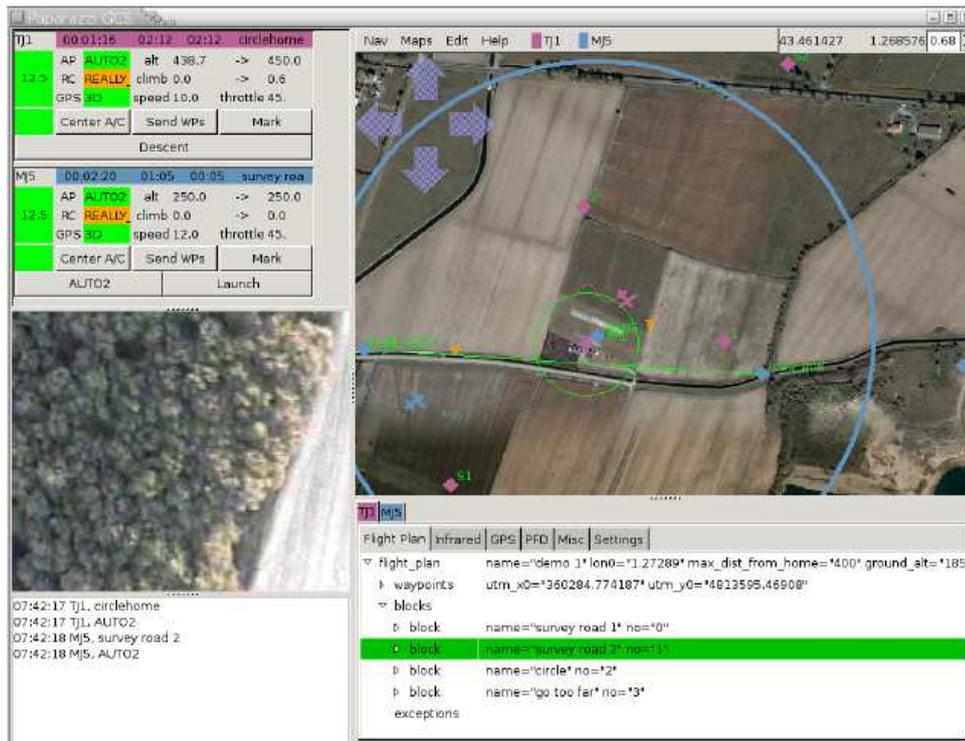


FIG. A.7 – L'interface graphique de la station sol de *Paparazzi*.

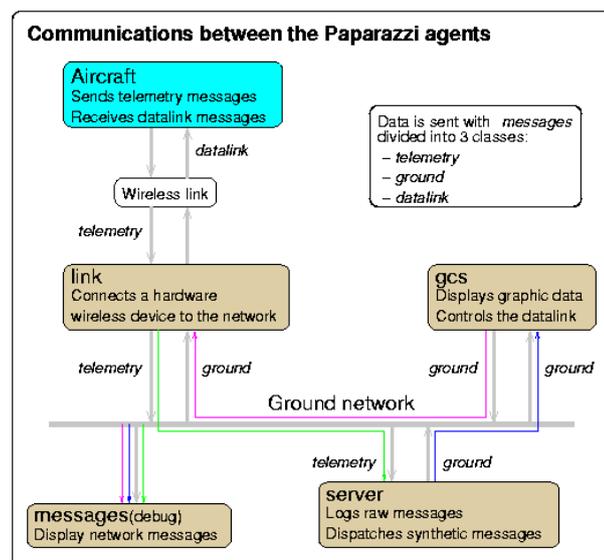


FIG. A.8 – La communication entre les agents du système *Paparazzi*.

Bibliographie

- ALAMI, R., CHATILA, R., FLEURY, S., GHALLAB, M. et INGRAND, F. (1998a). An architecture for autonomy. *International Journal of Robotics Research*, 17(4):315–337.
- ALAMI, R., FLEURY, S., HERRB, M., INGRAND, F. et ROBERT, F. (1998b). Multi robot cooperation in the Martha project. *IEEE Robotics and Automation Magazine (Special Issue on “Robotics & Automation in the European Union”)*, 5(1):36–47.
- ARRICHELLO, F., CHIAVERINI, S. et FOSSEN, T. (2006). Formation control of underactuated surface vessels using the null-space-based behavioral control. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 5942–5947.
- AVALLE, M. et PATIN, B. (2007). Mission management system for UCAV. *In RTO meeting, AVT146, platform innovations and system integration for unmanned air, land and sea vehicles*.
- BALCH, T. et ARKIN, R. C. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6):926–939.
- BALTIÉ, J., BENSANA, E., FABIANI, P., FARGES, J.-L., MILLET, S., MORIGNOT, S., PATIN, B., PETITJEAN, G., PITOIS, G. et PONCET, J. C. (2007). Mission management system for package of unmanned combat aerial vehicles. *In 2nd National Workshop on Control Architectures of Robots*.
- BEARD, R., LAWTON, J. et HADAEGH, F. (2001). A coordination architecture for spacecraft formation control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 9(6):777–790.
- BELLINGHAM, J., RICHARDS, A. et HOW, J. (2002). Receding horizon control of autonomous aerial vehicles. *In Proceedings of the 2002 American Controls Conference*, pages 3741–3746.
- BELLINGHAM, J., TILLERSON, M., RICHARDS, A. et HOW, J. P. (2001). Multi-task allocation and path planning for cooperative UAVs. *In Proceedings of the Conference on Coordination, Control and Optimization*.
- BERGÉ-LAVIGNE, M. et NOGRIX, P. (2006). Rapport d’information 215 sur le rôle des drones dans les armées. Rapport technique, Sénat.

-
- BORTOFF, S. A. (2000). Path planning for UAVs. *In Proceedings of the American Control Conference*, volume 1, pages 364–368.
- BRISSET, P., DROUIN, A., GORRAZ, M., HUARD, P.-S. et TYLER, J. (2006). The Paparazzi solution. Rapport technique, <http://www.recherche.enac.fr/paparazzi/papers.html>, ENAC University.
- CAO, Z., TAN, M., WANG, S., FAN, Y. et ZHANG, B. (2002). The optimization research of formation control for multiple mobile robots. *In Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*, volume 2, pages 1270–1274.
- CHEN, Y. Q. et WANG, Z. (2005). Formation control : a review and a new consideration. *In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3181–3186.
- CLARK, C. M., ROCK, S. M. et LATOMBE, J.-C. (2003). Dynamic networks for motion planning in multi-robot space systems. *In Proceedings of the 7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, Nara, Japan.
- DECHTER, R. et PEAR, J. (1985). Generalized best-first search strategies and the optimality of A*. *Journal of the ACM (JACM)*, 32(3):505–536.
- DEGIRMENCIYAN-CARTAULT, I., FALLAH-SEGHRUCHNI, A. et MARC, F. (2005). Multi-agent planning under constraints application to tactical aircraft simulation. *In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, pages 1–19.
- DESAI, J., OSTROWSKI, J. et KUMAR, V. (1998). Controlling formations of multiple mobile robots. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 2864–2869.
- DUBINS, L. E. (1957). On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 79:497–516.
- DUDEK, G., JENKIN, M. R. M., MILIOS, E. et WILKES, D. (1996). A taxonomy for multi-agent robotics. *Autonomous Robots*, 3(4):375–397.
- FAX, J. et MURRAY, R. (2004). Information flow and cooperative control of vehicle formations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(9):1465–1476.
- FIGLIORINI, E., LEONARD, N., BHATTA, P., PALEY, D., BACHMAYER, R. et FRATANTONI, D. (2004). Multi-auv control and adaptive sampling in monterey bay. *In Proceedings of the IEEE/OES Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, pages 134–147.

- FLEURY, S., HERRB, M. et CHATILA, R. (1997). Genom : A tool for the specification and the implementation of operating modules in a distributed robot architecture. *In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Grenoble, France.
- FORTUNE, S. (1987). A sweepline algorithm for voronoi diagrams. *Algorithmica*, 2(1):153–174.
- GANCET, J. et LACROIX, S. (2004). Embedding heterogeneous levels of decisional autonomy in multi-robot systems. *In Proceedings of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS'04)*, Toulouse, France.
- GARCIA, I. et HOW, J. P. (2005). Trajectory optimization for satellite reconfiguration maneuvers with position and attitude constraints. *In Proceedings of the 2005 American Control Conference*, pages 889–894.
- GAREY, M. R. et JOHNSON, D. S. (1979). *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. WH Freeman & Co.
- GAT, E. (1991). Integrating planning and reacting in heterogeneous asynchronous architecture for mobile robots. *Sigart bulletin*, 2:17–74.
- GIULIETTI, F., POLLINI, L. et INNOCENTI, M. (2000). Autonomous formation flight. *Control Systems Magazine*, 20(6):34–44.
- GUTIN, G. et PUNNEN, A. P. (2006). *The travelling salesman problem and its variations*. Kluwer Academic Publishers.
- HAISSIG, C. M. (2004). Military formation flight as a model for increased capacity in civilian airspace. *In Proceedings of the 23rd Digital Avionics Systems Conference*.
- HATTENBERGER, G., ALAMI, R. et LACROIX, S. (2006). Planning and control for unmanned air vehicle formation flight. *In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China.
- HATTENBERGER, G., ALAMI, R. et LACROIX, S. (2007a). Autonomous configuration control for UAV formation flight in hostile environments. *In Proceedings of the 6th IFAC symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*.
- HATTENBERGER, G., LACROIX, S. et ALAMI, R. (2007b). Formation flight : Evaluation of autonomous configuration control algorithms. *In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- HERRB, M. (2007). *GDHE - Graphic Display for Hilare Experiments*.
- HOROWITZ, R. et VARAIYA, P. (2000). Control design of an automated highway system. *In Proceedings of the IEEE*, volume 88, pages 913–925.

-
- INGRAND, F., CHATILA, R., ALAMI, R. et ROBERT, F. (1996). PRS : a high level supervision and control language for autonomous mobile robots. *In Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, USA.
- LAFFERRIERE, G., CAUGHMAN, J. et WILLIAMS, A. (2004). Graph theoretic methods in the stability of vehicle formations. *In Proceedings of the American Control Conference*, volume 4, pages 3729–3734.
- LAND, A. H. et DOIG, A. G. (1960). An automatic method for solving discrete programming problems. *Econometrica*, 28:497–520.
- LAVALLE, S. et KUFFNER, J.J., J. (1999). Randomized kinodynamic planning. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 473–479.
- LAVALLE, S. M. (2006). *Planning Algorithms*. Cambridge University Press.
- LIAN, F.-L. et MURRAY, R. M. (2002). Real-time trajectory generation for the cooperative path planning of multi-vehicle systems. *In Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*.
- LIU, X., GOLDSMITH, A., MAHAL, S. et HEDRICK, J. (2001). Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons. *In Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems*, pages 625–630.
- METTA, G., FITZPATRICK, P. et NATALE, L. (2006). YARP : yet another robot platform. *International Journal on Advanced Robotics Systems, Special Issue on Software Development and Integration in Robotics*, 3(1):043–048.
- MUSCETTOLA, N., DORALS, G. A., FRY, C., LEVINSON, R. et PLAUNT, C. (2002). IDEA : Planning at the core of autonomous reactive agents. *In Proceedings of the 3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space*.
- OGREN, P., EGERSTEDT, M. et HU, X. (2002). A control lyapunov function approach to multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(5):847–851.
- OLLERO, A., LACROIX, S., MERINO, L., GANCET, J., WIKLUND, J., REMUSS, V., PEREZ, I., GUTIERREZ, L., VIEGAS, D., BENITEZ, M., MALLET, A., ALAMI, R., CHATILA, R., HOMMEL, G., LECHUGA, F., ARRUE, B., FERRUZ, J., MARTINEZ-DE DIOS, J. et CABALLERO, F. (2005). Multiple eyes in the skies : architecture and perception issues in the comets unmanned air vehicles project. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12(2):46–57.
- PANT, A., SEILER, P. et HEDRICK, K. (2002). Mesh stability of look-ahead interconnected systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(2):403–407.

- PANT, A., SEILER, P., KOO, T. et HEDRICK, K. (2001). Mesh stability of unmanned aerial vehicle clusters. *In Proceedings of the 2001 American Control Conference*, volume 1, pages 62–68.
- PARK, S., DEYST, J. et HOW, J. P. (2004). A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking. *In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*.
- RAFFARD, R. L., TOMLIN, C. J. et BOYD, S. P. (2004). Distributed optimization for cooperative agents : application to formation flight. *In Proceedings 2004 IEEE Conference on Decision and Control*, Nassau, Bahamas.
- REYNOLDS, C. W. (1987). Flocks, herds, and schools : A distributed behavioral model, in computer graphics. *In Proceedings of the SIGGRAPH '87 Conference*, volume 21, pages 25–34.
- RUSSEL, S. J. et NORVIG, P. (1995). *Artificial Intelligence : a modern approach*. Prentice-Hall, Inc.
- SCHOUWENAARS, T., DE MOOR, B., FERON, E. et HOW, J. (2001). Mixed integer programming for multi-vehicle path planning. *In Proceedings of the European Control Conference*.
- SCHOUWENAARS, T., FERON, E. et HOW, J. (2002). Safe receding horizon path planning for autonomous vehicles. *In Proceedings of the 40th Allerton Conference on Communication, Control, and Computation*.
- SCHOUWENAARS, T., STUBBS, A., PADUANO, J. et FERON, E. (2006). Multivehicle path planning for nonline-of-sight communication. *Journal of Field Robotics*, 23(3-4):269–290.
- SEANOR, B., GU, Y., NAPOLITANO, M., CAMPA, G., GURURAJAN, S. et ROWE, L. (2006). 3-aircraft formation flight experiment. *In Proceedings of the 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 1–6.
- SEILER, P. et SENGUPTA, R. (2001). Analysis of communication losses in vehicle control problems. *In Proceedings of the American Control Conference*, volume 2, pages 1491–1496.
- SHAO, J., YU, J. et WANG, L. (2006). Formation control of multiple biomimetic robotic fish. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2503–2508.
- SOUSA, J., SIMSEK, T. et PRAVIN, V. (2004). Task planning and execution for UAV teams. *In Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, volume 4, pages 3804–3810.
- SPRY, S. et HEDRICK, J. (2004). Formation control using generalized coordinates. *In Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, volume 3, pages 2441–2446.
- SVETKA, P. et OVERMARS, M. H. (1998). Coordinated path planning for multiple robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 23:125–152.

-
- SWAROOP, D. et HEDRICK, J. (1996). String stability of interconnected systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(3):349–357.
- TAN, K.-H. et LEWIS, M. (1996). Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. *In Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 132–139.
- TANNER, H., PAPPAS, G. et KUMAR, V. (2004). Leader-to-formation stability. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(3):443–455.
- TOMLIN, C., PAPPAS, G. J. et SASTRY, S. (1998). Conflict resolution for air traffic management : a study in multiagent hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(4):509–521.
- VOLPE, R., NESNAS, I., ESTLIN, T., MUTZ, D., PETRAS, R. et DAS, H. (2001). The CLARAty architecture for robotic autonomy. *In Aerospace Conference*, pages 121–132.
- ZELINSKI, S., KOO, T. et SASTRY, S. (2003). Hybrid system design for formations of autonomous vehicles. *In Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, volume 1, pages 1–6.

Title : Formation Flight without Formation : control and planing for unmanned aerial vehicles flying in formation

Abstract

This thesis presents the study and the implementation of a system that manages autonomously the configuration of a formation of unmanned aerial vehicles, or UAVs. The purposes are to improve the safety and the efficiency of a group of military UAVs, and to fill the gap between mission planning layers and formation control layers.

Formation flight is particularly suited for military applications in hostile environments, that require synchronizations on target arrivals or mutual support for jamming. One of the difficulties raised is the autonomous choice of the configuration. Our approach is to develop an intermediate layer, dedicated to the formation and to the management of its configuration, between the deliberative and fonctionnal layers. Once a configuration is specified, it has to be allocated to the UAVs according to the tactical constraints and the available ressources. As the safety of the flight is a prime issue, reconfiguration maneuvers are planned to switch between two configurations, with respect to a security distance.

Solutions have been developed based on the *Branch & Bound* algorithm to solve the assignment problems, and on the A* algorithm for reconfiguration trajectories planning. Moreover, a formation control has been implemented, allowing to validate our approach, both with simulations and real experimentations.

Keywords: Autonomous navigation, Formation flight, Multi-robots, UAVs, Trajectory planning, Assignment problems, Graph search.

Auteur : Gautier HATTENBERGER

Titre : Vol en Formation sans Formation : contrôle et planification pour le vol en formation des avions sans pilote

Directeurs de thèse : Rachid Alami et Simon Lacroix

Lieu et date de soutenance : LAAS-CNRS, le 24 janvier 2008

Résumé

L'objet de cette thèse est l'étude et la mise en œuvre d'un système de gestion automatique de la configuration d'une formation d'avions sans pilote, ou drones. Les objectifs sont, d'une part, d'améliorer la sécurité et l'efficacité d'un groupe de drones de combat, et, d'autre part, de faire le lien entre les niveaux de planification de missions et les niveaux fonctionnels de contrôle de la formation.

Le vol en formation est particulièrement bien adapté pour des applications militaires en milieux hostiles, qui requièrent des synchronisations pour l'arrivée sur les cibles ou du support mutuel pour le brouillage. L'une des difficultés soulevées est le choix autonome de la configuration. Notre approche est de mettre en œuvre, entre les niveaux décisionnels et les niveaux fonctionnels, une couche intermédiaire dédiée à la formation et à la gestion autonome de sa configuration. La configuration ainsi déterminée doit être affectée aux avions de la formation en tenant compte des contraintes tactiques et des ressources de chacun. Enfin, la sécurité du vol est un élément primordial. Il faut donc pouvoir planifier des manœuvres de reconfiguration pour passer d'une configuration à une autre, en respectant les distances minimales entre avions.

Des solutions ont été développées à partir de l'algorithme *Branch & Bound* pour résoudre les problèmes d'allocations, et de l'algorithme A* pour la planification de trajectoires dans la formation. De plus, un contrôle de vol de la formation a été implémenté. Ceci a permis de valider notre approche par des simulations et des expérimentations réelles.

Mots-clés: Navigation autonome, Vol en formation, Multi-robots, Drones, Planification de trajectoires, Problèmes d'allocations, Recherche de graphes.

Discipline : Systèmes Embarqués

Adresse du laboratoire :
LAAS-CNRS
Groupe RIS
7, avenue du Colonel Roche
31077 Toulouse Cedex 4

