

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira - Bejaia
Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique.

Spécialité : Automatique et informatique industrielle.

Thème

Allocation de tâches et modélisation d'un essaim de drone

Préparé par :

- BENAHMED Asma
- LASLA Rayane

Examiné par :

Dirigé par :

Mr TIGHZERT Lyes

Mr NAIT MOHAND Nacim

Mr LEHOUCHE Hocine

Date de soutenance : 04/07/2023

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement

Avant toute chose, nous voudrions exprimer notre gratitude et nos remerciements à Allah, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la force, la persévérance et la guidance tout au long de notre parcours. Par Sa grâce et Sa miséricorde infinie, nous avons pu achever ce mémoire de fin d'études.

Nous sommes conscients que sans Son soutien et Sa bénédiction, rien n'aurait été possible.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et

L'encadrement de Mr Tighzert Lyes, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire

Nous remercions chaleureusement les membres du jury Mr LEHOUCHE Hocine et Mr Nait Mohand pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail et de participer à la soutenance

Nos remerciements vont également à nos parents, qui ont été nos piliers tout au long de notre parcours. Leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant ont été notre source de motivation.

Leur confiance en nous a été un moteur essentiel pour atteindre nos objectifs.

On tient à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail, qu'elles voient en ces mots l'expression de notre gratitude pour leur présence, pour leur dévouement et pour l'aide inestimable qu'elles nous ont apportées tout au long de ce parcours. Un petit bout de chemin certes, mais un grand enrichissement

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes deux frères, a toute ma famille et ceux qui ont partagé avec moi toutes les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé au long de mon travail.

A ma meilleure et mes proches et à tout ce qui me donne de l'amour et la vivacité.

A tous mes collègues de travail et l'équipe de maison serir à qui je souhaite plus de succès.

Benahmed Asma

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes parents, qui m'ont doté d'une éducation

digne, Leur amour a fait de moi ce que je suis

aujourd'hui

Mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous

les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils

m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de

mon parcours.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et

de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Lasla Rayane

Table des matières

Table des matières:

Introduction générale	1
Chapitre I: Étude de l'état de l'art de l'allocation de tâches à un essaim de drones.	
I.1. Introduction	3
I.2. Généralités sur les drones.....	3
I.3. Historique des drones.	4
I.4. Catégories des drones.	6
I.4.1. Gros drones.....	6
I.4.2. Drones portables.....	6
I.4.3. Micro-drones	7
I.4.4. Drones stratosphériques.....	8
I.4.5. Drones hélicoptères	8
I.4.6. Drones européens	9
I.5. Les domaines d'utilisation des drones.....	9
I.5.1. Urgence.....	9
I.5.2. Surveillance et inspection des infrastructures	10
I.5.3. Science de la terre	11
I.5.4. Environnement.....	11
I.5.5. Défense et sécurité	12
I.6. Les quadrotors ou les rotors multiples.....	13
I.6.1. Les techniques de commande pour les quadrotors.....	14
I.6.2. Commande PID.	14
I.6.3. La commande par mode glissant.....	15

Table des matières

I.6.4. Backstepping	15
I.6.5. Commande adaptative.	16
I.7.4. Commande à saturation.	17
I.7. Conclusion.	18

Chapitre II : Modélisation dynamique d'un quadrotor.

II.1. Introduction.	20
II.2. Le fonctionnement d'un quadrotor	20
II.3. Modélisation dynamique d'un quadrotor	21
II.4. Les mouvements du quadrotor	22
II.5. Mécanique du vol du quadrotor.....	24
II.5.1. L'angle d'Euler.	25
II.5.2. Vitesse angulaire	26
II.5.3. Vitesse linéaire	26
II.6. Les effets physiques agissants sur le quadrotor.....	26
II.6.1. Les forces	26
II.6.2. Les moments	27
II.6.3. Effet gyroscopique.	28
II.7. Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler.....	28
II.8. Equations de mouvement de translation.....	30
II.9. Equation de mouvement de rotation.....	31
II.10. Représentation d'état du système.....	32
II.11. Conclusion.....	33

Chapitre III : Planification de trajectoire et évitement d'obstacle.

III.1. Introduction.....	35
--------------------------	----

Table des matières

III.2. Planification de trajectoires pour les drones.	35
III.3. Modélisation sous Simulink du quadrotor	37
III.3.1. Planification de la trajectoire.....	37
III.3.2. PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé)	38
III.3.3. Partie 3.	38
III.4. La stabilité de quadrotor.....	39
III.5. Résultats du Simulink	39
III.6. Optimisation Par Essaims de Particule.....	44
III.7. Principe du PSO.	44
III.8. Avantages et inconvénients de PSO.....	48
III.9. Domaines d'utilisation du PSO.....	48
III.10. Planification de trajectoire	49
III.11. Poursuite de trajectoire.....	50
III.12. Allocation des taches.....	51
III.12.1 Les essaims de drones	51
III.12.2. Principe de l'allocation des taches	52
III.13. Problématique	53
III.14. Conclusion	57
Conclusion général.....	59

Liste d'abréviation

Liste d'abréviation

UAV : Unmanned Aerial Vehicle.

IAI : L'industrie aérospatiale sioniste.

GPS : Système de position mondial.

NASA : National Aeronautics and Space Administration.

CEA : Commissariat à l'énergie atomique.

USA : united States of America.

EADS : European Defense and Space Company.

UAS : Unmanned Aerial System.

SIG : System information geographies.

CAO: Conception assistée par ordinateur.

PID : Proportionnel intégral dérivé.

Introduction
générale

Introduction générale

Introduction générale

Gâce à l'évolution rapide des technologies et de l'informatique, les drones, ou "drones" en anglais (terme dérivé du mot "bourdon" en raison du bruit de ces appareils), ont connu une adoption et une diversification impressionnantes. Toutefois, le terme "drone" ne désigne que le vecteur aérien, et non l'ensemble du système nécessaire à l'accomplissement de la mission. C'est pourquoi l'OACI et des instances européennes telles que l'EASA utilisent généralement le terme UAS, en opposition à UAV. La dénomination est également utilisée dans le référentiel réglementaire. Les termes UAV et RPV, bien que couramment employés, tendent à devenir obsolètes. Il existe aussi des appareils hybrides optionnellement pilotés, appelés OPV.

Un système de drone est généralement composé d'un ou plusieurs appareil volants porteurs de charges utiles, d'un segment-sol comportant une ou plusieurs stations de commande et de recueil de l'information, ainsi que d'une équipe de support (maintenance, mise en œuvre, récupération). Il nécessite également des liaisons de données entre le vecteur et ses opérateurs. Toutefois, la composante essentielle du système reste l'homme. Bien que l'engin volant soit inhabité, il n'est pas pour autant déshumanisé : de plus en plus automatisé, il reste sous contrôle humain. Le degré d'autonomie ou d'automatisation à conférer au système est d'ailleurs un sujet de recherche prometteur. Par ailleurs, les drones, utilisés pour des missions opérationnelles diversifiées et souvent programmées avant le vol, ne peuvent être comparés à l'aéromodélisme, qui est destiné exclusivement à des fins de loisir ou de compétition [1].

Le terme de drone recouvre aujourd'hui une réalité variée, désignant des vecteurs de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres d'envergure, d'une masse de quelques grammes à plusieurs tonnes, ce qui complique la compréhension de leurs spécificités. Dans le domaine militaire, différentes classifications de drones existent (OTAN, DOD, forces américaines, etc.), basées sur les caractéristiques et performances des vecteurs aériens, la nature des liaisons de données, les effets produits ou le niveau d'emploi au sein de la chaîne de commandement. Le drone quadrotor, avec ses quatre rotors, doit être contrôlé de manière appropriée pour maintenir la stabilité du vol sur trois axes.

Un vol stable est essentiel pour la sécurité et un vol fluide ainsi qu'un contrôle optimal lors des missions. Le quadrotor est conçu pour éliminer la complexité du mécanisme d'hélicoptère appelé « swash plate ». Notre travail est divisé en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** explore les différentes approches de l'allocation des tâches à un essaim de drones, en présentant les drones en général et les quadrotors en particulier.

Introduction générale

- **Le deuxième chapitre** traite de la modélisation du problème d'allocation des tâches.
- **Le troisième chapitre** contient le développement d'un algorithme d'allocation des tâches, la simulation du système ainsi que les résultats obtenus.

Cette structure vise à fournir une compréhension approfondie des drones et de leur utilisation, en particulier dans le contexte de l'allocation des tâches et du contrôle des quadrotors. Cependant, la question demeure : comment optimiser le contrôle des quadrotors pour garantir une répartition efficace des tâches et assurer la stabilité du vol, en particulier en utilisant la commande PID ?

Chapitre I

***Étude de l'état de l'art de
l'allocation de tâches d'un
essaim de drones***

I.1. Introduction

De nos jours, la technologie des drones, ou véhicules aériens sans pilote (UAV), a été développée en tant qu'avion polyvalent et a reçu un très grand encouragement. Cela est dû aux applications appropriées pour les UAV, telles que l'armée, l'agriculture, la surveillance et autres. Le plus grand avantage de l'utilisation d'un drone est qu'il peut embarquer sans humain lors de missions complexes ou risquées.

Étant donné que les giravions sont généralement instables, un contrôleur de stabilisation d'attitude devient une partie importante des systèmes UAV. Il stabilise automatiquement l'assiette du véhicule, empêche le véhicule de s'effondrer et maintient également l'orientation souhaitée pendant le vol. Une stabilisation d'attitude robuste doit être développée afin de soutenir l'application du comportement de vol d'un UAV.

Ce chapitre permettra dans une première partie de voir les différents types de drones, leur classification et leur domaine d'application selon la mission à accomplir. Par la suite, nous présenterons les différentes techniques de commande linéaire et non linéaire appliquées au quadrotor.

I.2. Généralités sur les drones

Les drones, également appelés véhicules aériens sans pilote (UAV), sont des appareils aériens autonomes qui peuvent être contrôlés à distance ou programmés pour voler de manière autonome. Ils sont souvent équipés de caméras, de capteurs et d'autres instruments pour effectuer des tâches spécifiques, comme la surveillance, la cartographie, la livraison de colis, la recherche et sauvetage et la photographie aérienne, entre autres. Ils ont également le potentiel de réduire les coûts et les risques associés à de nombreuses tâches, ainsi que de rendre certaines tâches plus rapides et plus efficaces.

Cependant, les drones peuvent également poser des défis en termes de réglementation et de sécurité, en particulier lorsqu'ils sont utilisés dans des zones peuplées ou à proximité d'aéroports et des zones militaires. Les gouvernements et les régulateurs travaillent à mettre en place des règles pour assurer une utilisation sûre et responsable des drones.

Ces derniers ont deux fonctions de base : le mode vol et navigation. Pour voler, les drones doivent disposer d'une source d'alimentation telle qu'une batterie ou du carburant ils ont aussi des rotors, des hélices et un cadre. Les châssis d'un drone sont généralement constitués

d'un matériau composite léger pour réduire le poids et augmenter la maniabilité comme ils nécessitent un contrôleur qui permet à l'opérateur d'utiliser des télécommandes pour lancer, naviguer et faire atterrir l'avion. Les contrôleurs communiquent avec le drone à l'aide d'ondes radio [2].

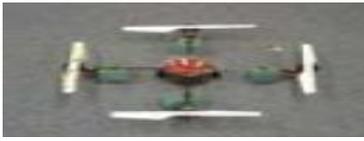
I.3. Historique des drones

Les drones sont avant tout une invention militaire ; leurs origines remontent aux conflits au Proche-Orient à la fin des années 1970. Dans la guerre entre le colonisateur sioniste et les pays arabes. Des modèles réduits des drones avec des appareils photo sont utilisés par les sionistes pour découvrir la région, mais il fallait quarante-cinq minutes pour développer les photos. L'industrie aérospatiale sioniste (IAI) a lancé le programme Scout (des caméras de télévision volantes avec des ailes, un moteur et un système de communication).

Le développement de drones aériens s'accélère et suscite un intérêt croissant ; après l'utilisation militaire en renseignement et surveillance comme nous avons déjà dit, l'utilisation civile a fait irruption dans ce domaine tel que la gestion des infrastructures, la surveillance jour et nuit et l'observation de sites sensibles.

L'intérêt actuel pour les drones ne doit pas masquer le fait qu'ils ont déjà une longue histoire : au cours de la première guerre mondiale, quelques spécialistes audacieux ont réussi à faire voler des avions-cibles radiocommandés, sans pilote à bord. L'arrivée de l'informatique dans les années 1960 a alors permis d'envisager des engins autonomes, capables d'opérer au-dessus d'une zone donnée afin d'y recueillir de précieuses informations. C'est à cette époque que sont apparus en France les premiers drones européens, tel le R20 développé par la société Nord-Aviation et dérivé de l'engin cible CT20 utilisé comme cible pour les avions de chasse ou les missiles. Destiné à la surveillance des champs de bataille, ce drone de reconnaissance R20, opérationnel de 1966 à 1976, est muni d'un programme de vol interne, ce qui le rend insensible aux brouillages. Depuis cette époque, les progrès considérables réalisés dans des domaines tels que l'informatisation, la robotique, l'optronique, l'imagerie radar ou encore la transmission de données ont permis d'étendre l'utilisation des drones à des missions de plus en plus diversifiées. De plus, le concept de conflit « zéro mort », d'origine américaine – en réalité le souhait d'une stricte limitation des pertes humaines, ne peut qu'amplifier l'emploi de ces engins [3].

Tableau I.1 : Principales Thèses et Projets de Recherche des quadrotors.

Projet	Université	Photo
Mesicopter	Stamford	
E.Allug's Thèse	Pennsylvanie	
P.Castillo's Thèse	Compiègne	
A.Clifon's Thèse	Vanderbilt	
P.Pounds's Thèse	ANU	
N.Guenard's Thèse	CEA	
Sarmac	Stamford	
M.Kemper's Thèse	Oldenburg	
P.Tournier's Thèse	MIT	
MD4-200	Microdrones GmDH	

Le **tableau I.1** proposée par l'auteur S. Bouabdallah [4], regroupe les principales thèses et projets de recherche sur les quadrotors et microdrones avec leurs Institutions Associées.

I.4. Catégories des drones

I.4.1. Gros drones

Depuis plus d'un demi-siècle, des drones ont été développés dans le domaine militaire. Après quelques expériences anecdotiques, ils ont été utilisés systématiquement lors des conflits

« modernes », depuis les années 80, principalement par les israéliens et les américains, et par les forces alliées lors des deux guerres du Golfe. Ces engins ont notamment été utilisés pour des missions de reconnaissance et de surveillance. Néanmoins certains peuvent être armés, de missiles ou de mini-drones.

Ces avions de plusieurs tonnes possèdent une charge utile importante (jusqu'à une tonne pour le Global Hawk) et sont équipés de caméras (visible et infrarouge) et de radars divers. Ils sont reliés au sol via des communications haut-débit, habituellement via des satellites.



Figure I.1 : Drones militaires de surveillance : Global Hawk (Northrop Grumman, 1000kg de charge utile) et Sperwer (Sagem).

I.4.2. Drones portables

La deuxième grande catégorie de drones ne se distingue pas par leur mission principale, l'observation, mais par leur taille. Ces drones portables (figure I.1) de quelques kilogrammes sont conçus pour être transportés dans un sac à dos et mis en œuvre à l'aide d'une «station-sol» réduite à un ordinateur portable et un émetteur-récepteur permettant la communication avec le drone (les plus gros de ces mini-drones peuvent nécessiter l'usage d'une rampe de lancement pour le décollage). La charge utile essentielle d'un tel mini-drone est une caméra vidéo dont l'image est retransmise en continu à la station-sol. Avec un rayon d'action de quelques

Kilomètres l'objectif d'un mini-drone est d'aller voir « de l'autre côté de la colline » soit en étant piloté comme un modèle réduit standard soit de manière autonome en suivant une mission préprogrammée (une suite de waypoints), la navigation étant effectuée grâce à un positionnement GPS. Dans cette catégorie, le DO-MAV d'EADS-Dornier mesure 42cm d'envergure pour un poids de 500g. Il peut être mis en œuvre par un opérateur unique.



Figure I.2. Drones portables : Evolution (BAI Aerosystem) et DO-MAV (EADS-Dornier).

I.4.3 Micro-drones

Avec un but au militaire au départ, la miniaturisation des UAVs a été poursuivie. Pionnière dans le domaine dès les années 80 avec son Pointer, un avion de 4kg avec 1kg de charge utile, la société AeroVironment a construit un drone de 42g, le Black Widow équipé d'une caméra et capable de naviguer de manière autonome (GPS) avec une autonomie de 30mn. Mis à part la performance technologique, on peut douter de l'intérêt d'une telle miniaturisation qui d'une part réduit la charge utile à quelques grammes et dont les performances de vol sont forcément très dégradées en présence de vent.



Figure I.3: Micro drones: Black Widow (Aerovironment, 42g) et Micromechanical Flying Insect (UC Berkeley, 25mm).

La course à la miniaturisation est cependant loin d'être terminée et les études actuellement concernent des engins de quelques grammes dans ce cadre les recherches s'orientent vers des solutions s'inspirant du monde biologique en particulier pour l'aérodynamique en privilégiant le vol à ailes battantes. Le vol aux ailes battantes ou vibrantes est étudié au sein du projet REMANTA de l'ONERA : les problèmes à résoudre sont mécanique et aérodynamiques. Les écoulements induits par les mouvements complexes doivent être analysé finement afin de pouvoir optimiser le rendement du vol. Les autres problèmes à résoudre à ces échelles concernant la propulsion et l'énergie. L'intérêt militaire des micro-drones a été identifié depuis plusieurs années et la lecture du rapport [6] est aussi enrichissante qu'inquiétante [5].

I.4.4 Drones stratosphériques : Il existe également des drones d'une autre envergure, des grands drones, stratosphériques, prévus pour des vols à très haute altitude pour des durées a priori illimitées (plusieurs mois). L'objectif dans ce cas est de remplir une mission analogue à celle d'un satellite géostationnaire : observation et communication. Le leader pour cette technologie, en coopération avec la NASA, est encore la société AéroVironment.



Figure I.4 : Drone solaire Hélios.

I.4.5 Drones hélicoptères : De même qu'avec les aéronefs pilotés, certaines applications nécessitent la possibilité de pouvoir effectuer du vol stationnaire. Plusieurs solutions sont envisagées, la moins originale est hélicoptère classique. Les hélicoptères R-50 et RMAX de Yamaha sont commercialisés depuis plus d'une douzaine d'années. Il s'agit d'engins d'une Cinquantaine de kilos avec une charge utile de 20 et 30kg. Munis d'un système de navigation, ils sont capables d'effectuer des missions en autonomie complète. Aujourd'hui, plus de 1500 exemplaires sont utilisés au Japon pour des traitements agricoles [6], le RMAX, utilisé pour des prises de vues en environnements hostiles, coûte 200 000 \$ et nécessite une certification au Japon. Le quadrotor, avec ses quatre rotors indépendants, offre un contrôle simplifié et est étudié pour l'exploration des centrales nucléaires [7].



Figure I.5 : RMAX Yamaha et quadrotor Braunmod.

I.4.6 Drones européens : Bien qu'en retrait dans le domaine militaire (derrière Israël et les USA), l'Europe est active tant du côté académique qu'industriel sans oublier le domaine réglementaire. L'université technique de Braunschweig, Allemagne constitue un pôle de recherche important. L'université de Bristol, UK, a organisé en 2004 la 18^{ème} conférence internationale sur les UAV (anciennement Remotely Piloted Vehicles). L'ENSICA et Supaéro organisent depuis 2001 les Journées Micro-drones, regroupant une conférence et des démonstrations en vol aux universités. Selon le règlement, « ce concours a pour objet de démontrer la faisabilité technique et l'intérêt opérationnel des drones miniatures utilisés comme aide au fantassin dans sa progression en milieu hostile ». L'objectif ultime est la circulation autonome dans un milieu urbain d'un engin muni d'une caméra, avec pour mission de repérer des snipers. Les critères d'évaluations comprennent la simplicité de mise en œuvre, l'endurance, la miniaturisation, la discrétion, ...

Toujours dans le domaine de la défense, c'est EADS, en partenariat avec Dassault, Thales et Sagem, qui ont été retenus pour le développement d'un drone MALE pour l'état français. Cet EuroMALE est en particulier conçu pour coopérer avec le Sperwer (Sagem) déjà choisi par cinq autres pays européens.

I.5. Les domaines d'utilisation des drones

Les drones sont utilisés dans plusieurs cas et situations et parmi ces dernières on pourra constater :

I.5.1. Urgence

En prenant exemple des pompiers ces derniers peuvent utiliser des drones pour savoir si quelqu'un est en vie dans un immeuble en feu comme le montre la figure les drones peuvent

aider les pompiers à accéder en toute sécurité au bâtiment en feu et ils effectuent une navigation pour coordonner une trajectoire de vol traçable non dangereuse à travers l'incendie. De plus les véhicules sans pilote s'occupent de la surveillance des incendies des forêts et des vols de route automatique [8].



Figure I.6 : vue aérienne depuis un drone pompier en vue de secourir des victimes ou des vivants.

I.5.2. Surveillance et inspection des infrastructures

D'un intérêt particulier pour les industries de la construction, cet outil obtient une vue d'ensemble et une vidéo afin d'archiver le développement d'un bâtiment ou d'un projet en cours. Les drones aident à distinguer les lacunes de sécurité, les problèmes de réglementation et de conformité en matière de sécurité. Toutes les industries qui ont besoin d'enquêtes de haute précision, telles que les données environnementales ou la surveillance des déversements de produits chimiques et de pétrole, peuvent avoir de grandes possibilités d'utiliser une UAS pour l'étude continue de vastes étendues de terres agricoles. L'industrie peut facilement surveiller un travail en cours, détecter le matériel laissé ou les petits changements, obtenir rapidement une vue de modèle 3D et suivre les grandes infrastructures ou projets sur de longues périodes, en permettant une analyse approfondie et un suivi régulier de l'évolution et de l'état des travaux [8].



Figure I.7 : Drone assistant le suivi des sinistres.

I.5.3. Science de la terre

Les géomètres et les professionnels des SIG pouvaient compter sur la cartographie des UAS pour économiser du temps et de l'argent sur les projets d'arpentage et de cartographie. Le temps nécessaire à la collecte de données précises est considérablement réduit. En produisant des données détaillées précises sous le niveau des nuages – sous forme numérique géo référencée – les géomètres peuvent collecter des nuages de points 3D reproductibles de manière autonome dans un petit vol sur quelques kilomètres carrés de surface. Les progrès des logiciels photogrammétriques et de CAO dans les drones aident à l'ortho photographie professionnelle. D'autres activités complémentaires concernent les principales limites lithologiques, l'identification des différences entre les pentes et le volume stocké du sol et les caractéristiques géo structurelles telles que l'identification de la géométrie des pentes. En outre, le drone pourrait aider les scientifiques dans les domaines de la microphysique des nuages, des prévisions météorologiques et de la météorologie, de l'océanographie physique, des champs magnétiques, de la végétation, de la chimie de l'ozone, des niveaux de rayonnement, de la pollution troposphérique et de la qualité de l'air. Les entreprises de médias, telles que l'industrie cinématographique, les présentateurs de nouvelles et les professionnels pourraient exploiter un UAS qui permettrait de réaliser des images aériennes spectaculaires ou des vidéos en direct tournées. Cette plate-forme volante est capable de générer une haute résolution spatiale [8].



Figure I.8 : Produit commercial pour la photographie aérienne dans les médias.

I.5.4. Environnement

Avec une fréquence accrue, ces dispositifs peuvent soutenir les activités d'évaluation de la santé des cultures, les enquêtes agricoles, repousser les ravageurs. Les agriculteurs sont autorisés à étudier les cartes générées par drone pour reconnaître les terres agricoles des variations de cultures et des changements subtils avec le modèle numérique de terrain. Les UAS

aident à estimer les causes profondes des dommages (stress nutritionnel sur le corps) et à offrir des solutions, les performances des pâturages de manière très détaillée pour une vérification future. En outre, les experts agricoles utilisent des satellites pour surveiller la santé des cultures sous le niveau des nuages, du comptage des palmiers à grande échelle à petite échelle et du rendement en huile de noix de coco, et sont en mesure de mener des modèles d'irrigation et de drainage avec des caméras thermiques.



Figure I.9 : Drone de surveillance de la santé des cultures.

I.5.5. Défense et sécurité

Du côté de la défense, l'utilisation des drones pour la surveillance du trafic est en plein essor. Ces véhicules sans pilote sont essentiels pour la surveillance des données, la planification des transports, et diverses interventions telles que la gestion des incidents, le suivi des feux de circulation, l'assistance aux véhicules d'urgence, et la surveillance des mouvements des véhicules aux intersections. Ils sont rapides, économiques et opérationnels dans des conditions météorologiques difficiles ou lors d'évacuations, permettant d'évaluer les flux de circulation, les densités de trafic et de prédire les trajectoires des véhicules [9].

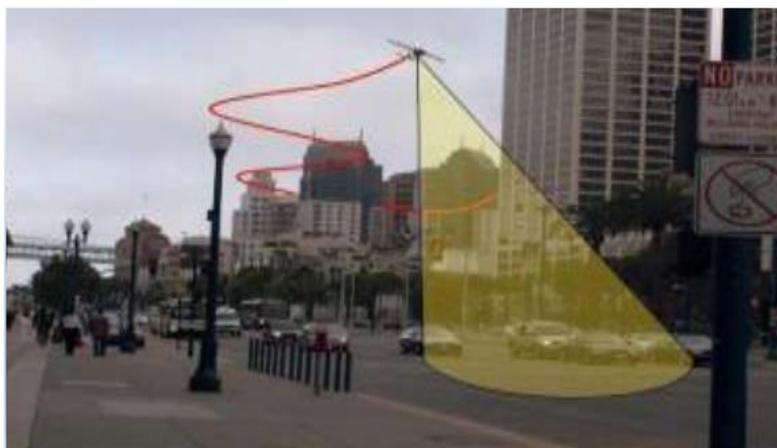


Figure I.10 : surveillance du trafic UAV.

I.6. Les quadrotors ou les rotors multiples

Ces robots volants sont généralement équipés de quatre rotors, mais il en existe avec six ou même huit rotors comme le montre la Figure 1.11. Un quadrotor se présente comme un drone miniature à 4 rotors, c'est un robot volant à six degrés de liberté, qui est contrôlé généralement avec des consignes sous forme de tension et en angles (tangage, roulis, et lacet). Les quadrotors sont des UAV de taille très réduite avec un faible poids. En comparant avec un hélicoptère classique équipé d'un seul rotor le quadrotor, offre une plus grande capacité de charge utile, ainsi qu'il est capable de voler plus près d'un obstacle et dans les milieux les plus complexes que l'hélicoptère classique qui dispose d'un grand rotor unique [10].



Figure I.11 : Exemples des drones à rotors multiples (Drouot, 2013).

Le premier quadrotor a été construit en 1907 par le français Charles Richet et les frères Breguet, et ils ont appelé ce drone « Breguet-Richet Gyroplane No.1 ». Le poids total de ce quadrotor était d'environ 510 kg. 15 ans plus tard, le Français Étienne Oehmichen a construit un quadrotor avec 4 rotors et 8 hélices, et il a utilisé un ballon d'hydrogène pour assurer la portance et une stabilité supplémentaire au système comme le démontre la Figure 1.12, en 1924, Oehmichen réussit à faire un premier vol sans le ballon à hydrogène [11].

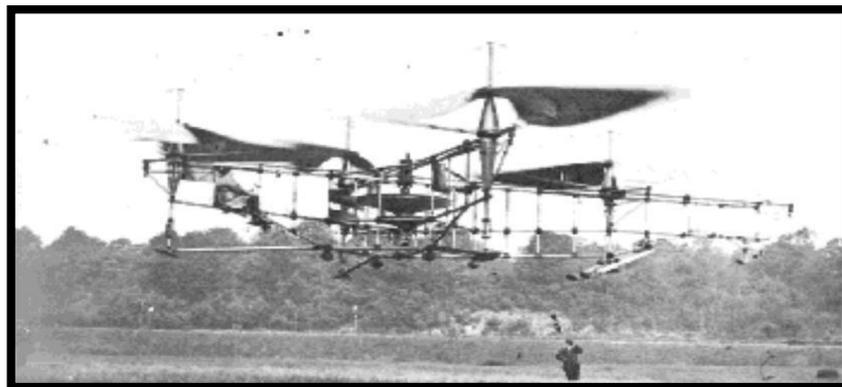


Figure I.12 : Quadrotor d'Étienne Oehmichen (Leishman, 2000).

I.6.1. Les techniques de commande pour les quadrotors

Un quadrotor est un robot volant caractérisé par une dynamique très complexe due aux nombreux effets physiques comme la gravité, les frottements, les effets aérodynamiques, les effets gyroscopiques, et les moments d'inertie [12]. Les expressions de ces effets physiques se diffèrent d'un mode de vol à un autre, ce qui rend la dynamique du quadrotor très complexe. En effet, la modélisation d'un quadrotor est une tâche délicate et indispensable pour concevoir un contrôleur stable et robuste vu que la dynamique du robot est pleinement couplée. Dans ce qui suit, nous commençons par une littérature concernant les différentes approches de développement de modèle dynamique du quadrotor suivi par une littérature sur les différentes techniques de commande pour les quadrotors afin de concevoir notre approche de commande qui sera appliquée.

Le développement d'un modèle mathématique pour un quadrotor consiste à considérer que le système est un corps rigide avec une structure parfaitement symétrique à laquelle ces sont appliquées des forces et des couples aérodynamiques générés par chaque moteur. Ensuite différentes approches sont utilisées pour écrire les équations dynamiques du système, comme (l'approche de Newton-Euler qui exploite les concepts des forces et des couples, ou l'approche de Lagrange qui exploite les concepts d'énergie potentielle et cinétique) [13] Au cours de ces dernières années plusieurs études ont été faites sur la modélisation et les commandes des quadrotors et peuvent être résumées comme suit :

[14] ont utilisé un modèle dynamique simple pour développer une commande backstepping avec intégrale, tandis que les autres auteurs ont utilisé un modèle dynamique complet. [15,16] ont développé un modèle dynamique du quadrotor qui est décomposé en trois sous-systèmes liés entre eux d'une façon que l'approche de commande développée est de type multi-entrées multi-sorties (Multiple Input Multiple Output - MIMO). [17] ont de même utilisé un modèle dynamique décomposé en trois sous-systèmes pour développer une commande backstepping adaptative. [18] ont proposé une commande backstepping basée sur la théorie de Serret-Frenet pour stabiliser l'attitude du quadrotor et améliorer le rejet des perturbations. [19] ont utilisé la dynamique inverse et une commande backstepping pour contrôler la position du quadrotor. Nous présenterons ainsi cinq techniques de commande soit: la commande par PID, la commande par mode glissant, le backstepping, la commande adaptative, et la commande à saturation.

I.6.2. Commande PID

La technique de commande PID (Proportionnel, intégral, dérivé) est certainement l'approche la plus connue et la plus simple à implémenter sur un système. Elle facilite la

compréhension du rôle physique de chacun des termes de la commande, ce qui permet donc de régler les gains. Le principe de commande par PID pour certains cas des drones est constitué de plusieurs régulateurs mis en cascade. En fonction des références en position, un premier PID génère les consignes en orientation permettant la stabilisation et les déplacements horizontaux. Ensuite, un second PID prend en charge le suivi de ces consignes en roulis, en tangage et en lacet. Enfin un troisième PID s'occupe de définir la poussée pour garantir les déplacements verticaux. Cette technique de commande a été testée avec succès sur plusieurs plateformes expérimentales comme les hélicoptères [20], les quadrotors [21] et les drones à rotors coaxiaux [22]. [23] a utilisé un régulateur linéaire quadratique (LQR) et un correcteur PID pour le contrôle d'attitude d'un quadrotor.

I.6.3. La commande par mode glissant

La commande par mode glissant est une stratégie de commande alternative très efficace concernant la sensibilité aux incertitudes paramétriques, de la famille des commandes à structure variable [24]. Cette méthode repose sur l'idée de forcer le système à suivre une trajectoire spécifique (le mode glissant) où les erreurs sont maintenues aussi faibles que possible, même en présence de perturbations ou d'incertitudes significatives. Pour appliquer cette méthode, on définit une surface de glissement qui représente une trajectoire souhaitée pour le système. L'objectif est de forcer le système à rester sur cette surface malgré les perturbations. Cette surface est souvent choisie de manière à être facile à calculer et à analyser, par exemple :

$$S(x) = x^T P x - \epsilon = 0 \quad (I.1)$$

Où : P est une matrice définie positive qui définit la forme de la surface de glissement et ϵ est une petite constante positive. Cette approche de commande n'est donc pas une fonction continue du temps. Au lieu de cela, elle passe d'une structure continue à une autre en fonction de la position actuelle dans l'espace d'état. Le fait que la commande soit discontinue est un élément important, car elle permet ainsi de stabiliser des systèmes qui ne le seraient pas avec des signaux continus. La commande par mode glissant a été utilisée avec succès sur des hélicoptères [25] et des quadrotors [26]. Par exemple, [27] ont proposé une commande par mode glissant avec une commande par PID pour le contrôle et la stabilisation d'un hélicoptère de type quadrotor, tandis que [28] ont développé une commande par mode glissant pour garantir le suivi de trajectoire désirée et assurer la stabilité de Lyapunov.

I.6.4 Backstepping

Le Backstepping, développé par Kanellakopoulos, Kokotovic et Morse en 1991 et inspiré des travaux antérieurs de Feuer (1978), Tsiniias (1989) ainsi que de Kokotovic avec Sussmann (1989), est une méthode avancée de commande non linéaire. Cette approche offre une méthode systématique pour concevoir une stratégie de commande visant à stabiliser asymptotiquement des systèmes dynamiques complexes tels que les quadrotors. Elle repose sur l'utilisation d'une fonction de Lyapunov $V(\mathbf{x})$ définie positive, dont la dérivée par rapport au temps est définie négative, assurant ainsi la stabilité du système.

$$\mathbf{u} = -\boldsymbol{\alpha}_1(\mathbf{x}) \nabla V_1(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\beta}_1(\mathbf{x}) \quad (I.2)$$

Pour un système de type quadrotor, la loi de commande par Backstepping pourrait prendre la forme :

$$\mathbf{u} = -\mathbf{k}_1 \nabla V_1(\mathbf{x}) - \mathbf{k}_2 \nabla V_2(\mathbf{x}) \quad (I.3)$$

Où V_1 et V_2 sont des fonctions de Lyapunov partielles choisies pour stabiliser l'attitude et la position du quadrotor, respectivement. Les constantes \mathbf{k}_1 et \mathbf{k}_2 sont des gains de contrôle appropriés.

La loi de commande est construite de manière récursive, ajoutant des termes de commande à chaque étape pour annuler les non-linéarités du système. Cette approche a été appliquée avec succès aux hélicoptères [29], aux quadrotors [30], et aux drones à rotor coaxiaux [31]. Par exemple, Bouabdallah (2007) a développé une commande par Backstepping spécifiquement pour le contrôle d'attitude et de la position d'un quadrotor, démontrant ainsi son efficacité dans la réalisation de commandes précises et robustes pour les systèmes aériens modernes.

I.6.5. Commande adaptative

La commande adaptative (Ioannou et Sun, 1984) [32] est une technique où les paramètres de commande varient en temps réel pour s'adapter à des changements dans la dynamique du système. Ces changements peuvent être dus à des erreurs de modélisation, à des incertitudes paramétriques ou à des perturbations externes avec des contrôleurs adaptatives.

Le contrôleur adaptatif ajuste les paramètres de commande en temps réel pour compenser les incertitudes et les perturbations. Une forme générale de contrôleur adaptatif peut être donnée par : $u = \varphi(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$, ensuite les paramètres adaptatifs $\boldsymbol{\theta}$ sont ajustés en fonction des erreurs de suivi et des signaux d'erreur. Une loi d'adaptation typique est souvent formulée comme : $\boldsymbol{\theta}' = -\Gamma \nabla \theta L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ Où Γ est une matrice définie positive de gains d'adaptation, et $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ est une fonction de coût qui mesure les écarts entre la sortie désirée et la sortie réelle du système.

Dans (Li et Krstić, 1997) [33], Li et Krstić ont proposé une commande adaptative qui

combine au même temps la commande backstepping et l'optimalité inverse (cette méthode a été appliquée sur les systèmes triangulaires avec des paramètres inconnus). (Amieur et Boumehraz, 2014) [34] ont utilisé une commande adaptative floue indirecte avec mode de glissement pour assurer la robustesse et atténuer les effets des perturbations externes pour un système non linéaire. (El Kari, Essounbouli et Hamzaoui, 2003) [35] ont proposé quant à eux une commande adaptative floue robuste dont le but de résoudre le problème de poursuite d'un système non linéaire incertain avec des perturbations externes. (Shaiful et Hazry, 2011) [36] ont utilisé une commande adaptative à base de réseau de neurones pour le contrôle d'attitude et la stabilisation du quadrotor. (Bouadi, Bouchoucha et Tadjine, 2007) [37] ont développé une commande par mode glissant basée sur une commande par backstepping adaptative dont le but de minimiser l'erreur de suivi et d'assurer la stabilité de Lyapunov.

I.6.6. Commande à saturation

Les techniques de commande à saturation [38] sont utilisées pour développer des stratégies de contrôle robustes et stables, notamment pour le pilotage de véhicules aériens confrontés à des incertitudes et des perturbations. Cette méthode a été appliquée avec succès au suivi de trajectoires pour des hélicoptères [39] et des drones à rotors coaxiaux [40]. Par exemple, Hamdan et Gao (2000) [41] ont conçu une commande par PID modifiée intégrant la saturation pour minimiser l'effet de l'hystérésis dans les vannes proportionnelles pneumatiques. Hall, Hodel et Hung (2001) [42] ont adopté une approche similaire pour restreindre la commande afin de respecter les capacités des actionneurs, comme illustré dans la figure 1.19. Aguilar-Ibañez, Martinez-Garcia et Soria-López (2011) [43] ont proposé un contrôle borné pour les systèmes dynamiques non linéaires sous-actionnés, intégrant des fonctions de saturation dans la boucle de contrôle pour assurer la stabilité globale du système en boucle fermée.

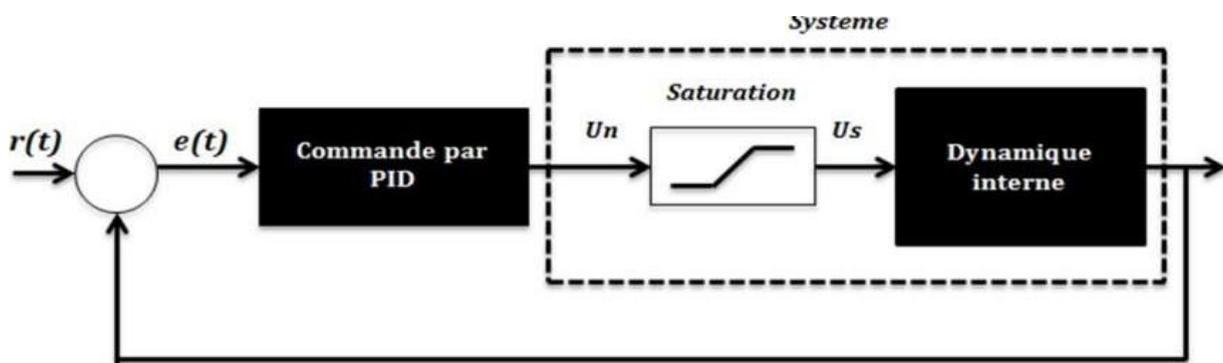


Figure I.13 : Commande par PID avec une fonction saturation (Hamdan et Gao, 2000)

I.7. Conclusion

À travers cette revue de littérature, nous avons exploré en profondeur le domaine des drones, en abordant leur historique, leur classification et leurs divers domaines d'application, avec un accent particulier sur le quadrotor, qui constitue le sujet principal de notre étude.

Le chapitre suivant sera donc consacré à la modélisation spécifique du quadrotor. Nous avons choisi la commande PID pour plusieurs raisons : elle est largement utilisée et bien comprise dans le domaine du contrôle automatique, offrant une solution robuste et efficace pour stabiliser et contrôler les drones, y compris les quadrotors. Sa simplicité et sa capacité à être ajustée facilement en fonction des besoins spécifiques du système en font un choix pertinent pour notre objectif de contrôle précis de l'attitude et de la position du quadrotor. En intégrant ces considérations, nous avons établi une base solide pour approfondir notre recherche sur la modélisation et le contrôle du quadrotor dans les chapitres à venir.

Chapitre II :

Modélisation dynamique d'un quadrotor

II.1. Introduction

Un quadrotor est un appareil volant comportant 4 rotors pour sa sustentation. Les 4 rotors sont généralement placés aux extrémités d'une croix, et l'électronique de contrôle est habituellement placée au centre de la croix. Afin d'éviter à l'appareil de tourner sur lui-même sur son axe de lacet, il est nécessaire que deux hélices tournent dans un sens, et les deux autres dans l'autre sens. Pour pouvoir diriger l'appareil, il est nécessaire que chaque couple d'hélice tournant dans le même sens soit placé aux extrémités opposées d'une branche de la croix [44, 45]. Et dans ce chapitre notre travail consiste à utiliser un algorithme de commande sans modèle basé sur la modélisation local pour commander un quadrotor en poursuite de trajectoires. Le modèle local est actualisé en temps réel en utilisant un estimateur des dérivées du signal de sortie. La loi de commande sans modèle en question est composée d'un terme calculé à partir du modèle local additionné a un terme de commande classique [46] [47].



Figure II.1. Exemple d'un système quadrotor [48].

II.2. Le fonctionnement d'un quadrotor

Le fonctionnement d'un quadrotor est assez particulier, on le pilote en commandant la puissance de chacun de ses 4 moteurs. En faisant varier astucieusement la puissance des moteurs, il est possible de le faire monter/descendre, de l'incliner à gauche/droite (roulis) ou en avant/arrière (tangage) ou encore de le faire pivoter sur lui-même (lacet).

Le quadrotor possède six degrés de liberté : trois mouvements de rotation (tangage, roulis, lacet) et trois mouvements de translation (vers l'avant/arrière, latéral gauche ou droite, et vertical vers le haut ou vers le bas). Ces six degrés doivent être commandés à l'aide de seulement quatre déclencheurs, ce qui en fait un système sous-actionné (le nombre des entrées est inférieur au nombre des sorties). Modéliser ces systèmes physiques avec des équations différentielles simples et fiables est une tâche

complexe, nécessitant la prise en compte de multiples facteurs tels que les frottements, les effets thermiques, le vieillissement, ainsi que la dispersion des caractéristiques de système due à la fabrication en série [48].

II.3. Modélisation dynamique d'un quadrotor

La modélisation des robots volant est une tâche délicate puisque la dynamique du système est fortement non linéaire et pleinement couplée.

En réalité, un grand nombre d'effets physiques ont lieu sur les robots volant. Malgré tout, il est nécessaire dans un premier temps d'effectuer des hypothèses afin d'éliminer ceux de plus faible importance

- La structure est rigide,
- Le drone possède une structure parfaitement symétrique ce qui induit que la matrice d'inertie sera supposée diagonal.
- La portance et la traînée de chaque moteur sont proportionnelles au carré de la vitesse, ce qui est une approximation très proche du comportement aérodynamique [49].

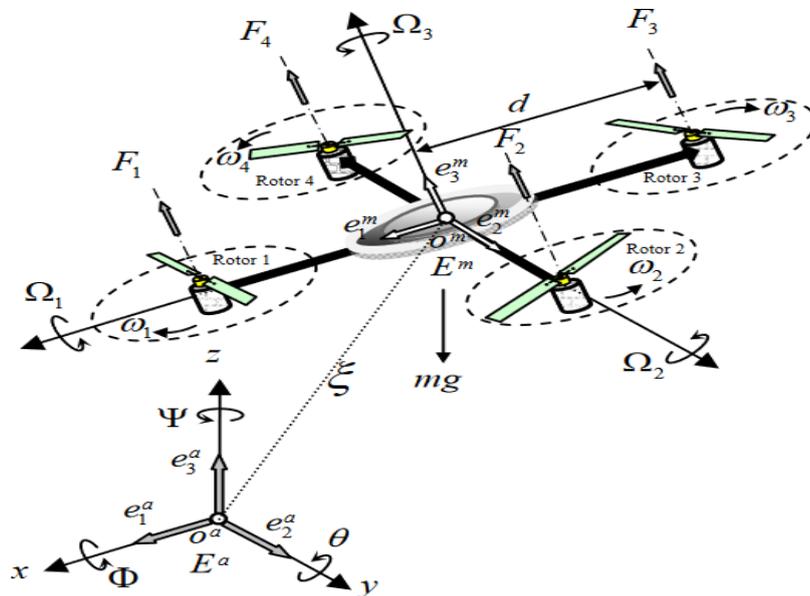


Figure II.2: Géométrie du quadrotor.

II.4. Les mouvements du quadrotor

Les mouvements de base du quadrotor sont réalisés en variant la vitesse de chaque rotor changeant ainsi la poussée produite. Ces mouvements sont couplés, ce qui signifie que le quadrotor ne peut pas faire de translation sans réaliser un mouvement de roulis (ϕ) ou de tangage (θ). Le quadrotor a cinq mouvements principaux : Mouvement vertical, mouvement de roulis, mouvement de tangage, mouvement de lacet et mouvement de translation.

✓ Le mouvement vertical

Le mouvement vertical correspond tout simplement à la montée/descente du quadrotor. La montée est obtenue en augmentant à valeur égale la vitesse des quatre moteurs ce qui a pour effet d'annuler les couples de rotation générés. La descente, s'obtient par la réduction de la vitesse des moteurs.

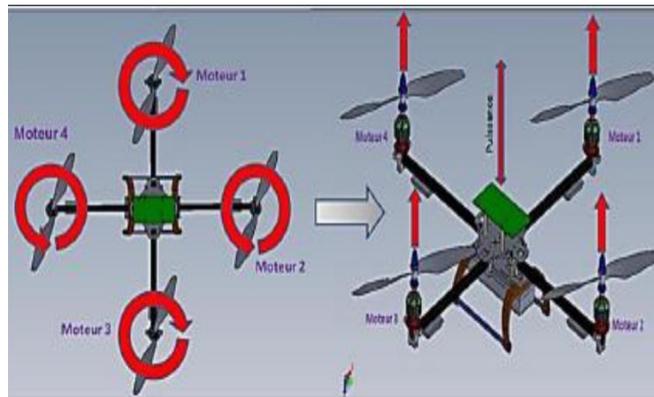


Figure II.3 : Mouvement vertical.

✓ Mouvement de roulis

Pour obtenir un mouvement de roulis, on applique un couple autour de l'axe, c'est-à-dire une différence de poussée entre le rotor (02) et le rotor (04). Ce mouvement de rotation autour de l'axe x est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe y.

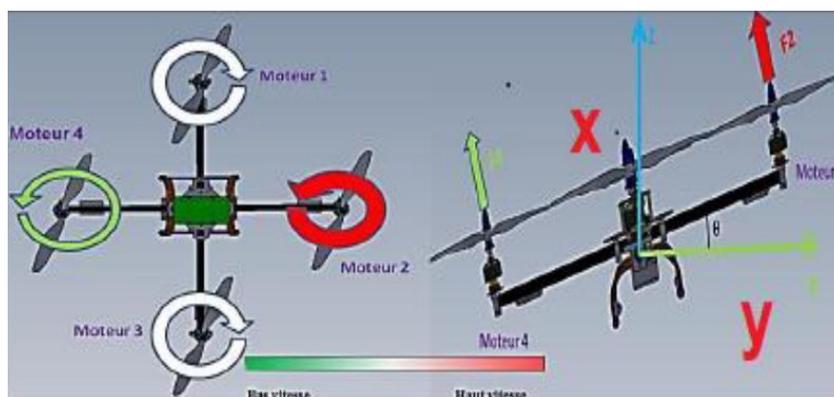


Figure II.4 : Mouvement de roulis.

✓ **Mouvement de tangage**

De la même façon en appliquant un couple autour de l'axe y , donc une différence de poussée entre le rotor (01) et le rotor (03) on obtient un mouvement de tangage. Ce dernier est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe x .

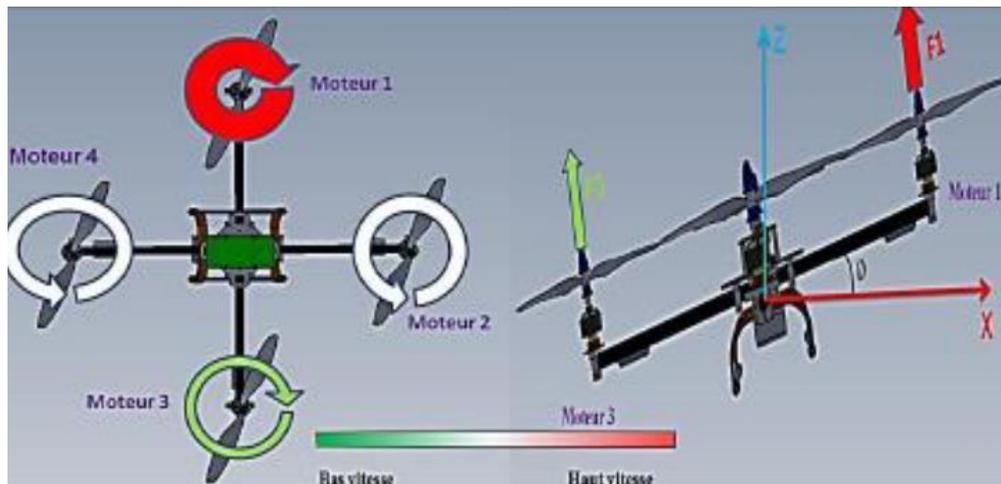


Figure II.5 : Mouvement de tangage.

✓ **Mouvement de lacet**

Le mouvement de lacet permet au quadrotor de pivoter sur lui-même. Pour cela, les rotors adjacents (1 et 3 d'un côté, 2 et 4 de l'autre côté) doivent tourner dans le même sens, tandis que ceux des côtés opposés doivent tourner dans des directions opposées. En augmentant la vitesse des rotors adjacents d'un côté tout en diminuant proportionnellement la vitesse des rotors adjacents de l'autre côté, on génère efficacement le mouvement de lacet requis.

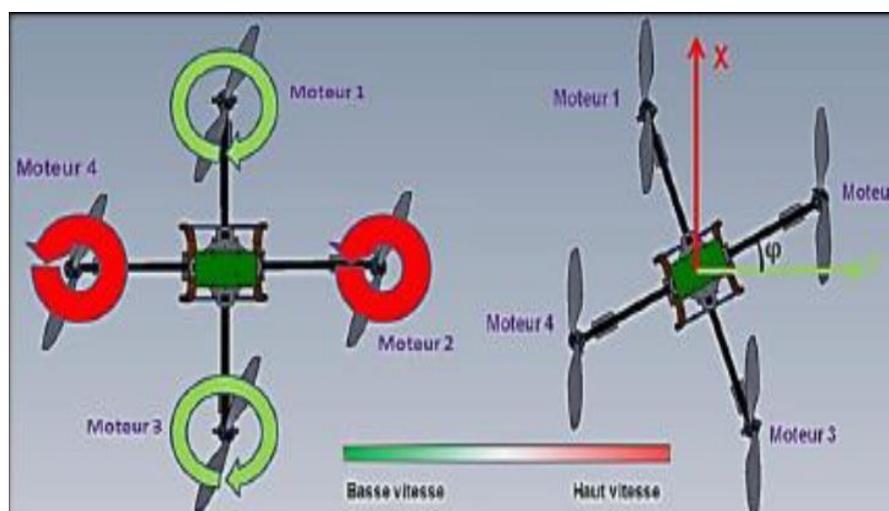


Figure II.6 : Mouvement de lacet.

✓ Mouvement de translation

Pour obtenir un mouvement de translation selon l'axe (X) ou (Y), il suffit de réaliser un roulis ou un tangage, en effet ces mouvements dépendent directement de la dynamique d'attitude.

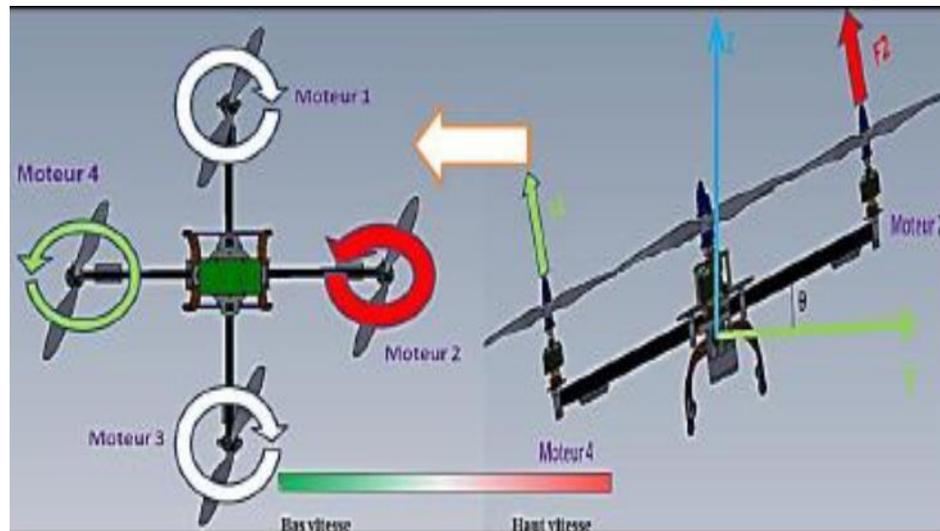


Figure II.7 : Mouvement de translation.

II.5. Mécanique du vol du quadrotor

La modélisation des structures volantes est une tâche délicate puisque la dynamique de ces derniers est généralement fortement non linéaire et couplée, Afin de pouvoir comprendre au mieux le modèle dynamique développé voici les différentes hypothèses de travail :

- La structure du quadrotor est supposée rigide et symétrique, ce qui induit une matrice d'inertie diagonale.
- Les hélices sont supposées rigides dans l'objectif de négliger l'effet de leur déformation lors de la rotation.
- Le centre de masse et l'origine du repère lié à la structure coïncident.
- Le centre de masse et l'origine du repère lié à la structure coïncident.

Pour évaluer le modèle mathématique du quadrotor, on utilise deux repères, le repère terrestre local supposé inertiel $\{RE\}$ et le repère lié à la structure $\{RB\}$ (Figure (2.7)). Le passage entre le repère lié à la structure et le repère terrestre local supposé inertiel est donné par une matrice dite matrice de transformation homogène R (décrit l'orientation de l'objet mobile).

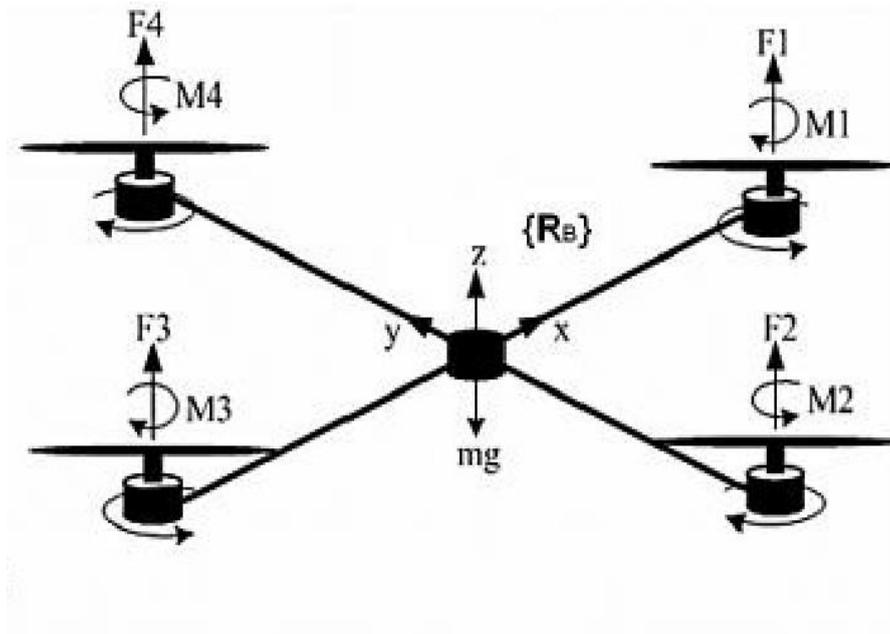


Figure II.8 : Définition des repères d'un quadrotor.

II.5.1. L'angle d'Euler [51]

Dans le repère terrestre $\{R_E\}$, le mouvement de rotation du quadrotor est décrit par les variables (ϕ, θ, ψ) . Cependant, dans le repère lié au solide $\{R_B\}$, la vitesse de rotation est décrite par les rotations de roulis, tangage et lacet $(\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)$, respectivement tels que :

- Roulis est une rotation de l'axe x d'un angle ϕ avec : $-\pi/2 < \phi < \pi/2$.
- Tangage est une rotation de l'axe y d'un angle θ avec : $-\pi/2 < \theta < \pi/2$.
- Lacet est une rotation de l'axe z d'un angle ψ avec : $-\pi < \psi < \pi$.

La formule de la matrice de transformation homogène est exprimée comme suit :

$$R_t = Rotx(\phi)Roty(\theta)Rotz(\psi)$$

$$R_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_t = \begin{bmatrix} c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi \\ c_\theta c_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi \\ -s_\phi & s_\phi c_\theta & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \tag{II.1}$$

Où c et s représentent les fonctions trigonométriques Cosinus et Sinus respectivement.

Remarque : On peut les noter comme on veut soit par exemple : $Cos(\theta)$ ou bien C_θ .

II.5.2. Vitesse angulaire

Les vitesses de rotation $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ dans les repères fixes sont exprimées en fonction des vitesses de rotation ϕ, θ, ψ dans le repère mobile, on a :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot_x(\phi)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + (Rot_y(\theta)Rot_x(\phi))^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \cos \phi \\ -\dot{\theta} \sin \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\psi \sin \theta \\ \psi \sin \phi \cos \theta \\ -\psi \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \psi \sin \theta \\ \dot{\theta} \cos \phi + \psi \sin \phi \cos \theta \\ \psi \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

Pour les petites rotations, on peut faire les approximations suivantes :

- $\cos \phi = \cos \theta = \cos \psi = 1$
- $\sin \phi = \sin \theta = \sin \psi = 0$

Donc la vitesse angulaire sera : $\Omega = [\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T$ (II.5)

II.5.3. Vitesse linéaire :

La vitesse linéaire v_x^b, v_y^b, v_z^b dans le repère fixe en fonction des vitesses linéaires v_x^m, v_y^m, v_z^m dans le repère mobile son donnée par :

$$V = \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} v_x^m \\ v_y^m \\ v_z^m \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

Où R représente est la matrice de rotation qui transforme les coordonnées du repère mobile au repère fixe.

II.6. Les effets physiques agissants sur le quadrotor :

Parmi les effets physiques qui agissent sur le quadrotor on constate :

- Les forces.
- Les moments dus à ces forces.
- L'effet gyroscopique.

II.6.1. Les forces :

Les différentes forces agissantes sur le système [50] [51]

- **Le poids du quadrotor :**

Le poids du quadrotor est donné par $P = mg$, où : m est la masse totale et g la gravité.

- **Les forces de poussée :**

Les forces de poussée qui sont des forces provoquées par la rotation des moteurs, elles sont perpendiculaires sur le plan des hélices. Ces forces sont proportionnelles au carré de la vitesse de rotation des moteurs.

$$F_i = b\omega^2 i \quad (II.7)$$

Avec $i = \overline{1:4}$, ω la vitesse angulaire, b le coefficient de portance il dépend de la forme et le nombre des pales et la densité de l'air.

- **Les forces de traînée :**

La force de traînée est le couplage entre une force de pression et la force de frottement visqueux, dans ce cas on a deux forces de traînée agissant sur le système qui sont :

➤ La traînée dans les hélices :

Elle agisse sur les pales, elle est proportionnelle à la densité de l'air, à la forme des pales et au carré de la vitesse de rotation de l'hélice, elle est donnée par la relation suivante :

$$T_h = d\omega^2 \quad (II.8)$$

Avec d le coefficient de drag, il dépend de la fabrication des hélices.

➤ La traînée selon les axes (x, y, z) : elle est due au mouvement du corps du quadrotor :

$$F_i = K_{ft}v \quad (II.9)$$

Avec : K_{ft} le coefficient de traînée de translation et v la vitesse linéaire.

II.6.2. Les moments :

Il y a plusieurs moments agissants sur le quadrotor, ces moments sont dus aux forces de poussée et de traînée et aux effets gyroscopiques.

- **Moments dus aux forces de poussée**

➤ La rotation autour de l'axe x : elle est due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors 2 et 4, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_x = l(F_4 - F_2) = lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (II.10)$$

Avec la longueur de bras entre le rotor et le centre de gravité du quadrotor.

- La rotation autour de l'axe y : elle est due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors 1 et 3, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_y = l(F_3 - F_1) = lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \quad (II.11)$$

Avec : M_x : Le moment de force autour de l'axe x, : M_y : Le moment de force autour de l'axe y, l : La distance entre les rotors et l'axe de rotation, F_4 et F_2 : Les forces de portance générées par les rotors 4 et 2 respectivement, ω_4^2 et ω_2^2 : Les carrés des vitesses angulaires des rotors 4 et 2

- **Moments dus aux forces de traînée :**

- La rotation autour de l'axe z : elle est due à un couple réactif provoqué par les couples de traînée dans chaque hélice, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_z = d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (II.12)$$

- Moment résultant des frottements aérodynamiques, il est donné par :

$$M_a = K_{fa} \Omega^2 \quad (II.13)$$

Avec K_{fa} : Le coefficient des frottements aérodynamiques et Ω est la vitesse angulaire.

II.6.3. Effet gyroscopique :

L'effet gyroscopique se définit comme la difficulté de modifier la position ou l'orientation du plan de rotation d'une masse tournante. Il est ainsi nommé en référence au mode de fonctionnement du gyroscope, appareil de contrôle de mouvement utilisé dans l'aviation (du grec gyro qui signifie rotation et scope, observer). Dans notre cas il y a deux moments gyroscopiques, le premier est causé par les hélices, l'autre est causé par le mouvement de quadrotor.

- Moment gyroscopique des hélices : il est donné par la formule suivante :

$$M_{gh} = \sum_{j=1}^4 \Omega \wedge J_r \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (-1)^{j+1} \\ \omega_j \end{bmatrix}, \text{ Avec } J_r \text{ est l'inertie des rotors.} \quad (II.14)$$

- Moment gyroscopique dû aux mouvements de quadrotor : il est donné par la relation suivante :

$$M_{gm} = \Omega \wedge j\Omega \quad (II.15)$$

II.7. Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler :

Grace à l'utilisation de la formulation de Newton-Euler, les équations sont écrites sous la forme

suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi} = v \\ m\ddot{\xi} = F_f + F_t + F_g \\ R = RS(\Omega) \\ J\dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_a - M_g \end{array} \right. \quad (II. 16)$$

Avec :

- ξ : le vecteur de position du centre de gravité du quadrotor.
- m : la masse totale du quadrotor.
- Ω : la vitesse angulaire exprimée dans le repère lié au quadrotor.
- R : la matrice de transformation homogène.
- F_f : la force totale générée par les quatres rotors.
- F_t : la force de trainée selon les axes (x, y, z).
- F_g : la force de gravité.
- J : la matrice d'inertie symétrique de dimension (3x3), elle est donnée par :

$$J = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (II. 17)$$

$S(\Omega)$: est la matrice antisymétrique ; pour un vecteur de vélocité $\Omega = [\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3]^T$, elle est donnée par:

$$S(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (II. 18)$$

- F_i : la force totale générée par les quatre rotors, elle est donnée par :

$$F_i = R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^4 F_i \\ F_i \end{bmatrix} \quad (II. 19)$$

- F_t : La force de trainée selon les axes (x, y, z), elle est donnée par :

$$F_t = \begin{bmatrix} -K_{ftx} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{fity} & 0 \\ 0 & 0 & -K_{ftz} \end{bmatrix} \dot{\xi} \quad (II. 20)$$

$K_{ftx}, K_{fity}, K_{ftz}$: Les coefficients de traînée de translation.

➤ F_g : La force de gravité, elle est donnée par :

$$F_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (II. 21)$$

➤ M_f : Moment provoqué par les forces de poussée et de traînée.

$$M_f = \begin{bmatrix} l(F_4 - F_2) \\ l(F_3 - F_1) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (II. 22)$$

➤ M_a : Moment résultant des frottements aérodynamiques, il est donnée par :

$$M_f = \begin{bmatrix} K_{ax}\dot{\phi} \\ K_{ay}\dot{\theta} \\ K_{az}\dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (II. 23)$$

K_{ax}, K_{ay}, K_{az} : les coefficients des frottements aérodynamiques.

II.8. Equations de mouvement de translation :

Après avoir présenté les équations des forces dans les sections précédentes, nous pouvons actuellement passer au modèle complet du quadrotor, nous utilisons la deuxième loi de Newton dans le cas de mouvement linéaire on a la formule suivante :

$$m\ddot{\xi} = F_f + F_t + F_g \quad (II. 24)$$

On remplace chaque force par sa formule, on trouve :

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i - \begin{bmatrix} K_{ftx}\dot{x} \\ K_{fity}\dot{y} \\ K_{ftz}\dot{z} \end{bmatrix} \quad (II. 25)$$

On obtient alors les équations différentielles qui définissent le mouvement de translation :

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m}(\cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi)\left(\sum_{i=1}^4 F_i\right) - \frac{K_{ftx}}{m}\dot{x} \\ \ddot{y} = \frac{1}{m}(\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi)\left(\sum_{i=1}^4 F_i\right) - \frac{K_{fity}}{m}\dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m}(\cos\phi\cos\theta) - \frac{K_{ftz}}{m}\dot{z} - g \end{cases} \quad (II. 26)$$

II.9. Equations de mouvement de rotation :

On applique le même principe de Newton pour le cas de rotation, on trouve la formule suivante :

$$J\Omega = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_a - M_{gh} \quad (II.27)$$

$$\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \wedge \left(\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} J_r \overline{\Omega}_r \dot{\theta} \\ -J_r \overline{\Omega}_r \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{ftx} \dot{\phi} \\ K_{fty} \dot{\theta} \\ K_{ftz} \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

On obtient alors les équations différentielles définissant le mouvement de rotation suivante :

$$\begin{cases} I_x \ddot{\phi} = -\dot{\theta}\dot{\psi}(I_z - I_y) - J_r \overline{\Omega}_r \dot{\theta} - K_{fax} \dot{\phi}^2 + lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ I_y \ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x) + J_r \overline{\Omega}_r \dot{\phi} - K_{fay} \dot{\theta}^2 + lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ I_z \ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta}(I_y - I_x) - K_{faz} \dot{\psi}^2 + d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \quad (II.29)$$

$$\overline{\Omega} = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 \quad (II.30)$$

En conséquence, le modèle dynamique complet qui régit le quadrotor est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \frac{(I_y - I_x)}{I_x} \dot{\phi}\dot{\psi} - \frac{J_r}{I_x} \overline{\Omega}_r \dot{\theta} - \frac{K_{fax}}{I_x} \dot{\phi}^2 + \frac{l}{I_x} U_2 \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_z - I_x)}{I_x} \dot{\phi}\dot{\psi} - \frac{J_r}{I_y} \overline{\Omega}_r \dot{\theta} - \frac{K_{fay}}{I_y} \dot{\theta}^2 + \frac{l}{I_y} U_3 \\ \ddot{\psi} = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\phi}\dot{\theta} - \frac{K_{faz}}{I_z} \dot{\psi}^2 + \frac{l}{I_z} U_4 \\ \ddot{x} = -\frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} + \frac{1}{m} U_x U_1 \\ \ddot{y} = -\frac{K_{fty}}{m} \dot{y} + \frac{1}{m} U_y U_1 \\ \ddot{z} = -\frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g + \frac{\cos(\phi) \cos(\theta)}{m} U_1 \end{array} \right. \quad (II.31)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_x = (\cos\phi \cos\psi \sin\theta + \sin\phi \sin\psi) \\ U_y = (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \end{cases} \quad (II.32)$$

Pour la matrice d'allocation, nous avons :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b}{2} & \frac{b}{2} & \frac{b}{2} & \frac{b}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} lb & -\frac{\sqrt{2}}{2} lb & -\frac{\sqrt{2}}{2} lb & -\frac{\sqrt{2}}{2} lb \\ \frac{\sqrt{2}}{2} lb & \frac{\sqrt{2}}{2} lb & \frac{\sqrt{2}}{2} lb & \frac{\sqrt{2}}{2} lb \\ d & -d & d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

Où les entrées sont choisies tels que :

- U_1 : est la commande de la puissance.
- U_2 : est la commande du roulis.
- U_3 : est la commande du tangage.
- U_4 : est la commande du lacet.

II.10. Représentation d'état du système

Pour un système physique il existe une multitude de représentations d'état, dans notre cas on choisit le vecteur d'état comme suit :

$$X = \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

On obtient alors la représentation d'état suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 x_4 \overline{\Omega_r} + b_1 U_2 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = a_4 x_2 x_6 + a_5 x_4^2 + a_6 x_2 \overline{\Omega_r} + b_2 U_3 \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = a_7 x_2 x_4 + a_8 x_6^2 + b_2 U_4 \\ \dot{x}_7 = x_8 \\ \dot{x}_8 = a_9 x_8 + \frac{1}{m} U_k U_1 \\ \dot{x}_9 = x_{10} \\ \dot{x}_{10} = a_{10} x_{10} + \frac{1}{m} U_y U_1 \\ \dot{x}_{11} = a_{11} x_{12} + \frac{\cos(\phi) \cos(\theta)}{m} U_1 - g \end{array} \right. \quad (II.35)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \\ a_2 = \frac{K_{fax}}{I_x} \\ a_3 = -\frac{I_y}{I_x} \\ a_4 = \frac{I_r}{I_z} \\ a_5 = -\frac{K_{fay}}{I_y} \\ a_6 = \frac{I_r}{I_y} \\ a_7 = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \\ a_8 = -\frac{K_{faz}}{I_z} \\ a_9 = -\frac{K_{ftx}}{m} \\ a_{10} = -\frac{K_{fty}}{m} \\ a_{11} = -\frac{K_{ftz}}{m} \\ b_1 = \frac{l}{l_x} \\ b_2 = \frac{l}{l_y} \\ b_3 = \frac{l}{l_z} \end{array} \right. \quad (II.36)$$

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans un premier temps, le principe de fonctionnement du quadrotor. Ce type de drone est constitué de quatre rotors, deux de ces rotors tournent dans un sens et les deux autres dans le sens inverse. En variant les vitesses de rotation de ces rotors, le quadrotor peut faire des mouvements différents aussi bien en translation qu'en rotation. Nous avons présenté ensuite les mouvements ainsi que la mécanique de vol du quadrotor selon le formalisme de Newton-Euler.

Chapitre III

Planification de trajectoire et évitement d'obstacle

III.1. Introduction

Les drones sont beaucoup étudiés depuis ces dernières années car leurs domaines d'applications sont de plus en plus nombreux [52] : missions de surveillance, de patrouille, d'exploration, de sauvetage, de transport... De plus, on souhaite, pour des raisons de praticité et de coût, que les drones effectuent des missions de manière de plus en plus autonome, ce qui fait croître leur complexité et nécessite donc une pluridisciplinarité d'expertise : automatique, informatique, interaction (capteurs), réseau...

Nous avons identifié deux grandes catégories de missions avec les problématiques de planification de trajectoire associées :

- Les missions d'exploration en intérieur, le drone va construire une carte de l'environnement dans lequel il naviguera ; l'appareil évoluera donc dans un environnement inconnu et peut alors être confronté à une perte du GPS (rarement disponible en intérieur) et à des obstacles dangereux ;
- Les missions de surveillance ou de livraison. Dans ce cas la planification de trajectoire est facile à réaliser car les zones dangereuses, interdites au survol, sont connues par avance. Cependant le drone peut être confronté à des obstacles non prévus, par exemple un autre drone ou un immeuble, voire un piéton lors de l'atterrissage et il doit être capable de réagir rapidement afin d'éviter toute collision.

III.2. Planification de trajectoires pour les drones

Le problème de la planification de trajectoires est un sujet de recherche qui dure depuis plusieurs années à cause de sa complexité. Les méthodes initialement développées étaient efficaces pour des modèles primitifs de véhicules se déplaçant dans des environnements simples, mais ne peuvent être utilisées dans des situations plus complexes et réalistes telles qu'un drone volant dans un espace 3D. Au cours des années, les modèles utilisés ont été raffinés pour inclure le comportement dynamique du véhicule et les détails d'un environnement 3D plus réaliste. Le concept de la meilleure trajectoire a aussi évolué.

Les approches classiques tentaient de calculer le chemin le plus court tandis que les méthodes récentes cherchent un chemin qui satisfait plusieurs contraintes. Dans le cas des drones, une trajectoire minimisant la distance, l'altitude et la consommation de carburant pourrait être préférable. Ceci n'est

qu'un exemple; les qualités recherchées varient souvent d'après l'objectif de la mission. Trouver la trajectoire optimale est en fait un problème d'optimisation dans un espace de recherche multidimensionnel qui ne peut être résolu en temps polynomial par des méthodes déterministes. Ces dernières ont donc été remplacées par des algorithmes non déterministes qui supportent mieux la complexité du problème. On ne trouve plus la meilleure solution à un problème simple, mais une bonne solution à un problème complexe et réaliste dans un temps raisonnable.

D'après les définitions précédentes, le problème de planification de trajectoires pour les drones consiste à représenter l'espace environnement en se basant habituellement sur une carte de données numériques d'élévation, construire l'espace de configuration d'après la forme du véhicule, définir l'espace d'état en considérant les caractéristiques dynamiques du drone pour ensuite résoudre le problème et trouver la route optimale reliant le point de départ au point d'arrivée tout en optimisant différentes caractéristiques. Une fois calculée, la route doit être convertie en trajectoire faisable en fonction du temps pour ensuite être suivie par le drone. D'après la description donnée ci-dessus, il est évident que l'approche directe est beaucoup trop complexe pour être possible. Plusieurs auteurs évitent cette complexité en divisant le Problème en quatre étapes. L'approche standard décrite dans [53] peut se résumer comme suit :

- Construire une représentation de l'environnement.
- Définir une fonction de coût qui évalue les qualités de la route optimale.
- Utiliser un algorithme d'optimisation pour trouver une route qui minimise la fonction de coût.
- Transformer ou lisser la route finale en une trajectoire faisable par le drone.

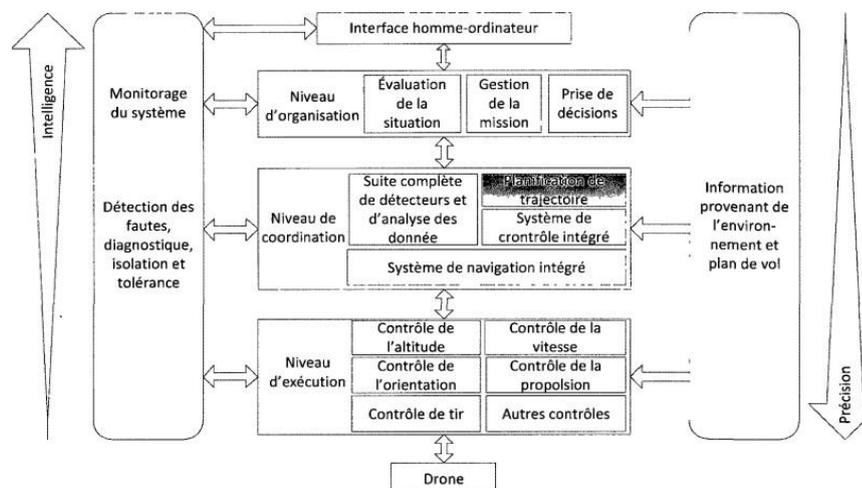


Figure III.1 : Architecture hiérarchique d'un système de contrôle autonome d'un drone.

III.3. Modélisation sous Simulink du Quadrotor

Après avoir modélisé le comportement du quadrotor au chapitre 2, nous passons à l'étape de la simulation afin de valider notre modèle. Pour cela, on a opté d'utiliser MATLAB/Simulink. A partir de l'expression des accélérations angulaire on établit un modèle sous Simulink :

Modélisation de la poussée et la trainée + l'effet gyroscopique + l'effet d'inertie.

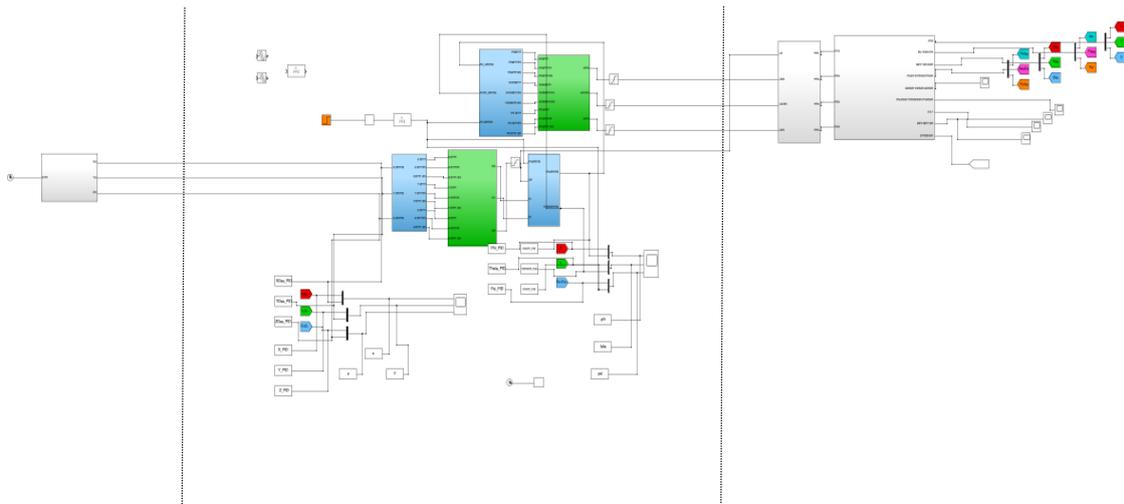


Figure III.2 : Schéma de commande du drone.

Ce qui donne 3 parties :

III.3.1. Planification de la trajectoire : ce schéma Simulink représente l'équation de la trajectoire désirée du quadrotor.

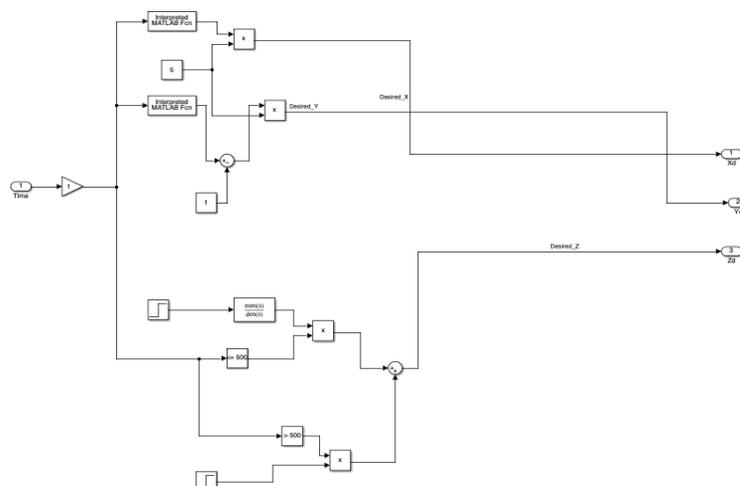


Figure III.3. Équation de la trajectoire.

III.3.2. PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé):

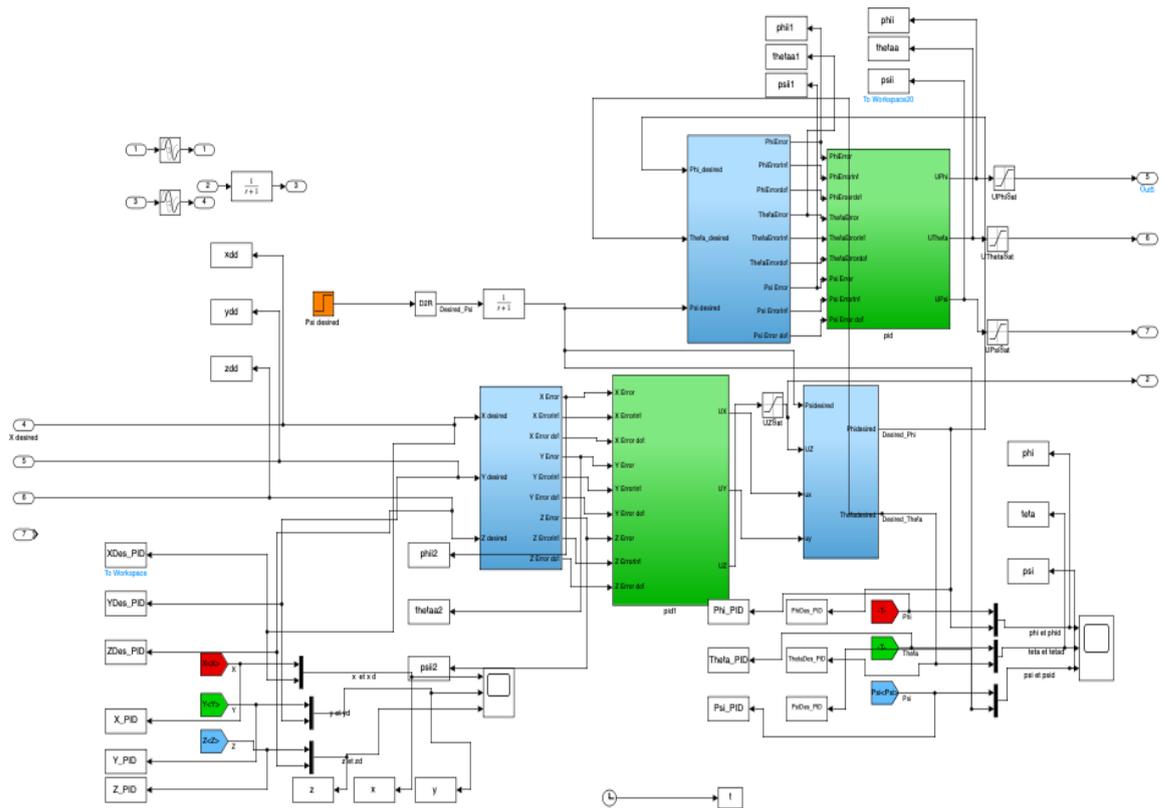


Figure III.4 : Commande PID.

III.3.3. Partie 3 :

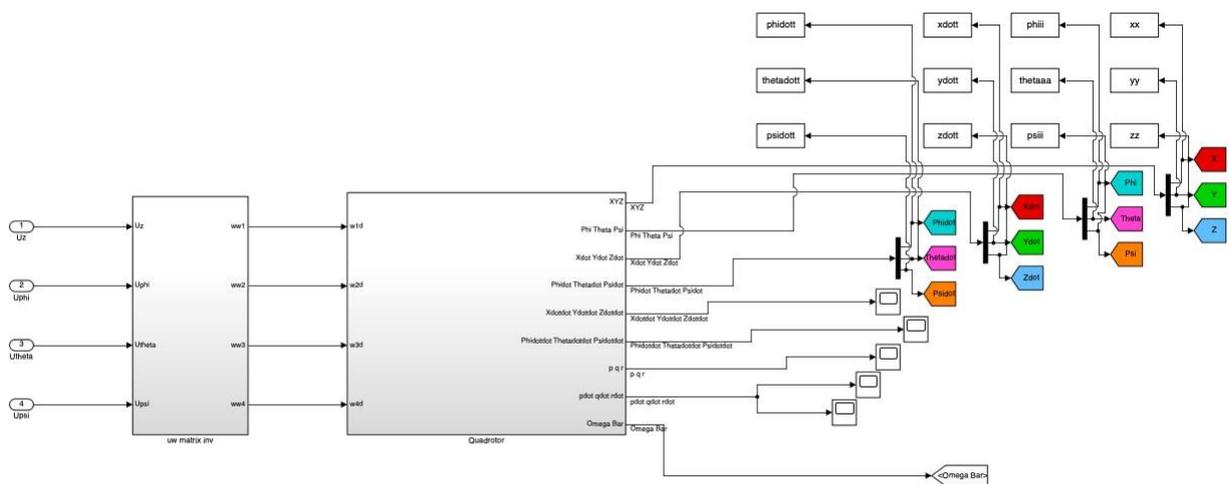


Figure III.5 : Sorties du modelé Simulink

III.4. La stabilité de quadrotor :

L'objectif du travail est d'assurer la stabilisation du quadrotor en l'absence de commandes extérieures le quadrotor doit se remettre en position horizontale, s'orienter vers un cap prédéfini et éventuellement monter ou descendre à une altitude fixée. Plusieurs stratégies de commande ont été appliquées, la commande par un correcteur proportionnelle intégrale dérivé (PID), la commande optimale LQ, la commande à logiquefloue et la commande PID avec un superviseur flou. Des résultats de simulation nous ont permet une comparaison entre les quatre lois de commande.

III.5. Résultats du Simulink :

Après avoir appliquée l'équation sur la figure III.2 on a pu obtenir ce résultat qui montre le léger contraste entre la trajectoire désirée et la trajectoire obtenue.

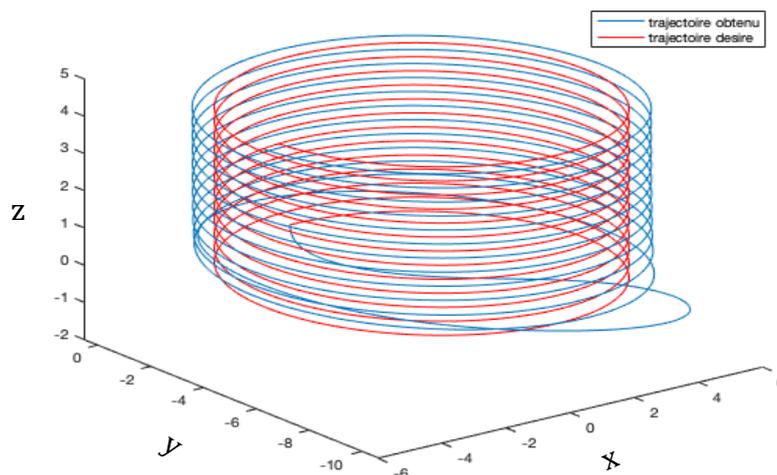


Figure III.10 : Trajectoire en hélice.

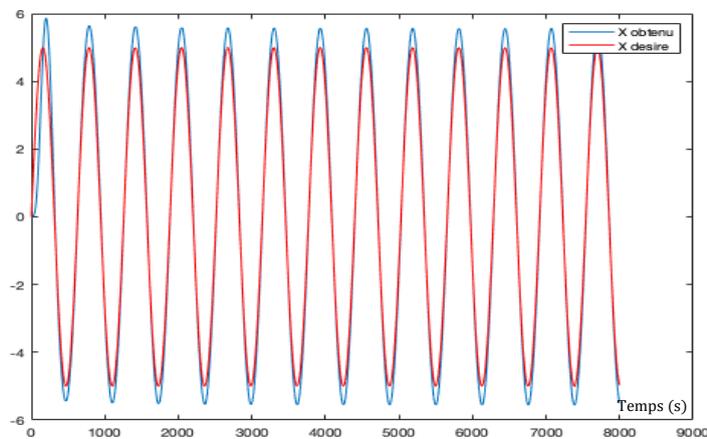


Figure III.11 : La réponse selon l'axe x.

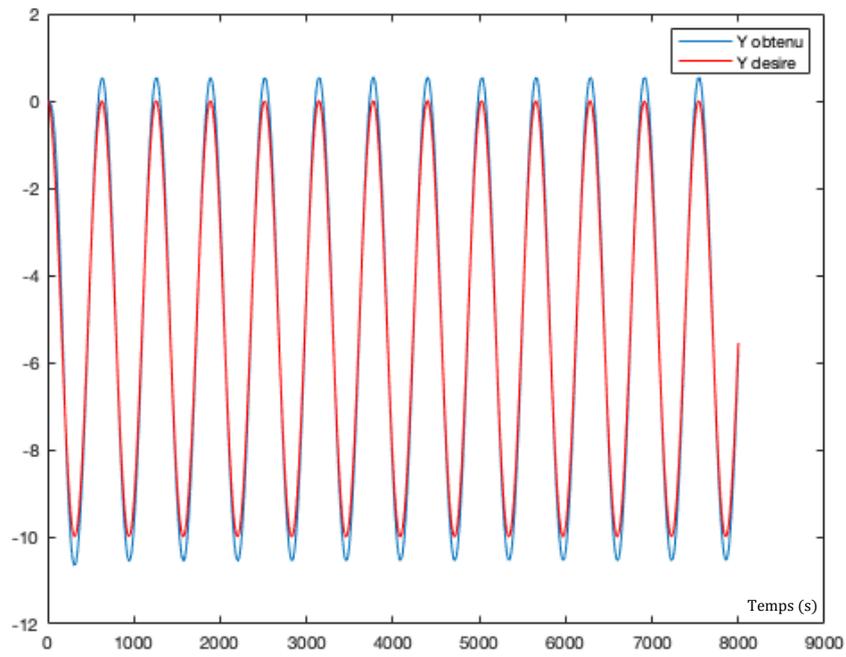


Figure III.12 : La réponse selon l'axe y.

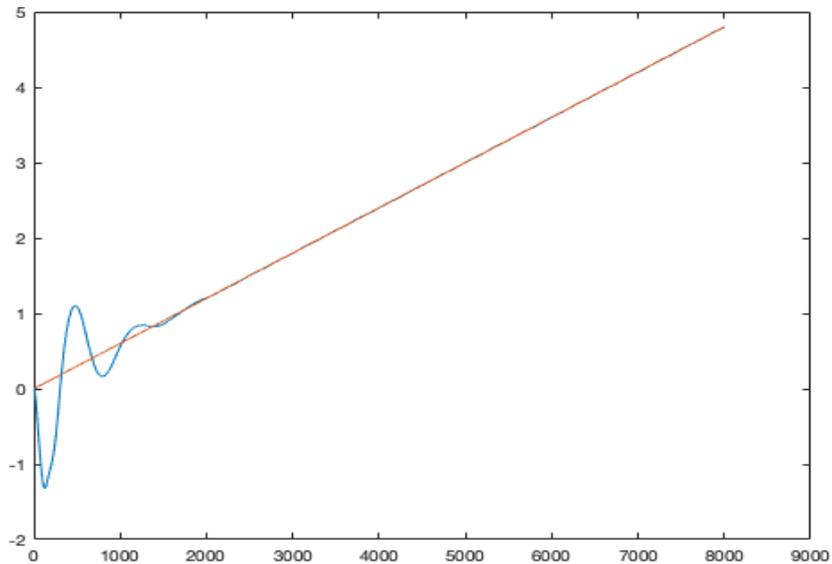


Figure III.13 : La réponse selon l'axe z.

- D'après les figures ci-dessus (III.10) (III.11) (III.12) (III.13) on peut constater que drone suit assez bien la trajectoire voulue.

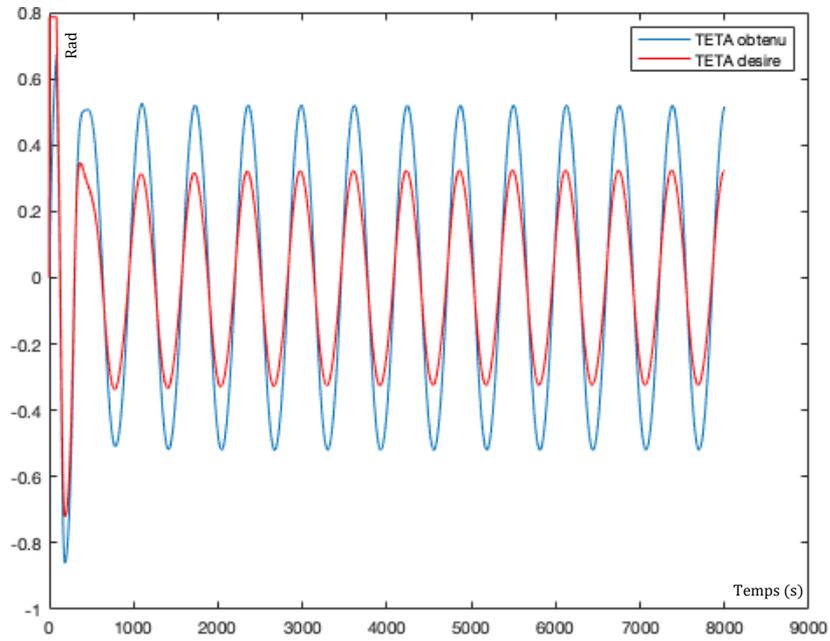


Figure III.14 : La réponse selon l'altitude θ .

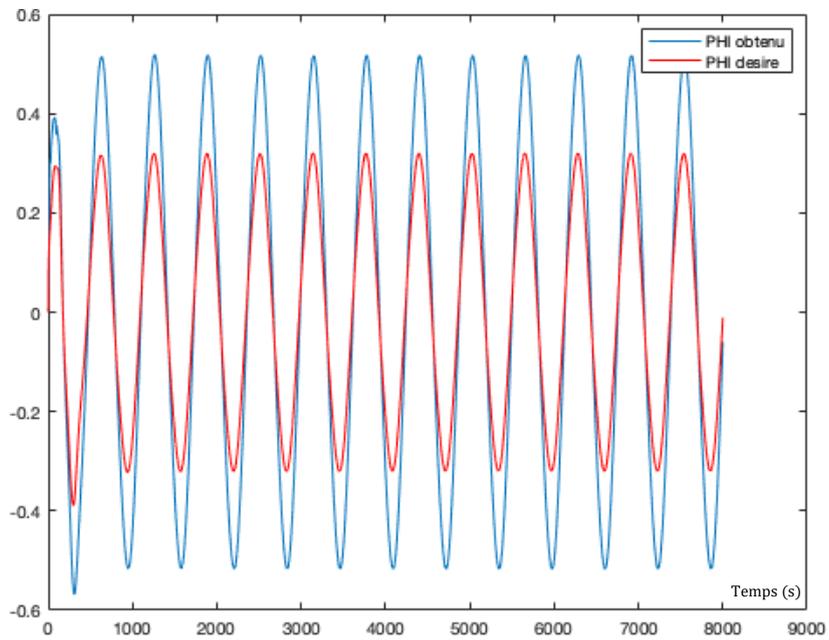


Figure III.15 : La réponse selon l'altitude ϕ .

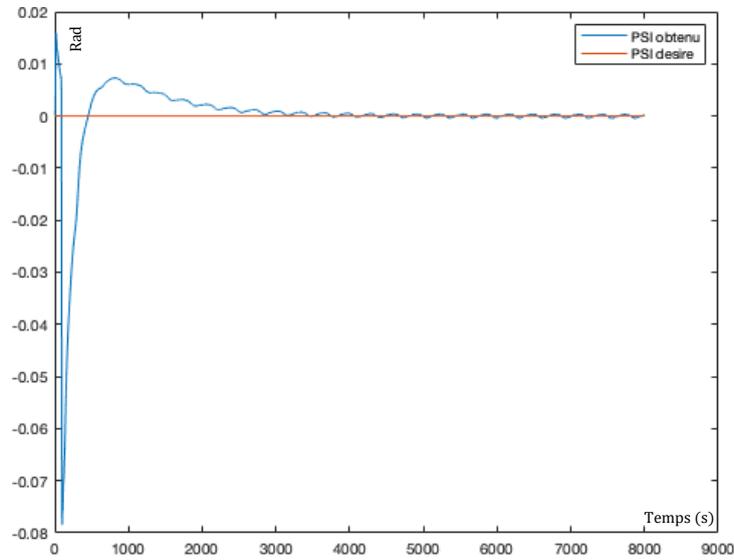


Figure III.16 : La réponse selon l'altitude ψ .

- D'après les résultats obtenus dans les trois figures précédentes on peut voir que la trajectoire obtenue concorde très bien avec la trajectoire désirée.

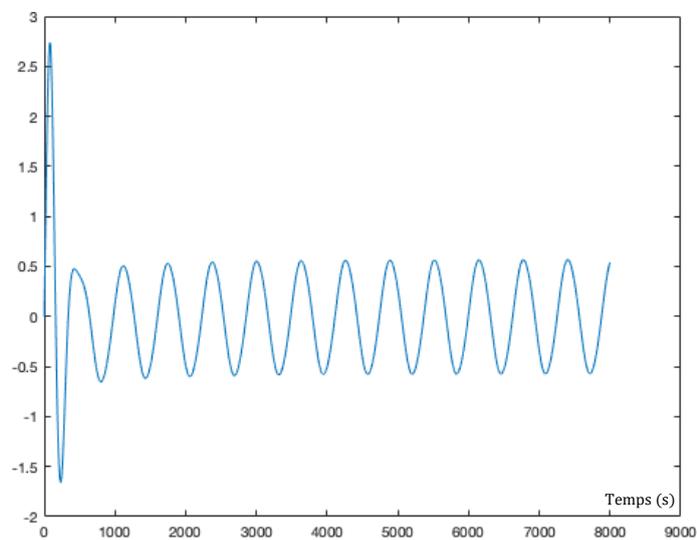


Figure III.17 : Erreur selon l'axe x

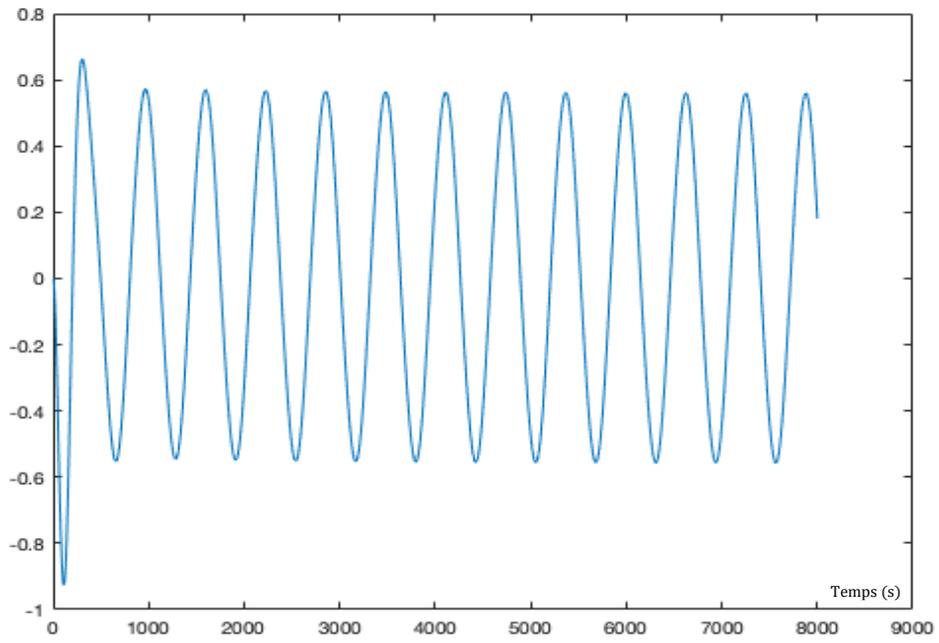


Figure III.18 : Erreur selon l'axe y.

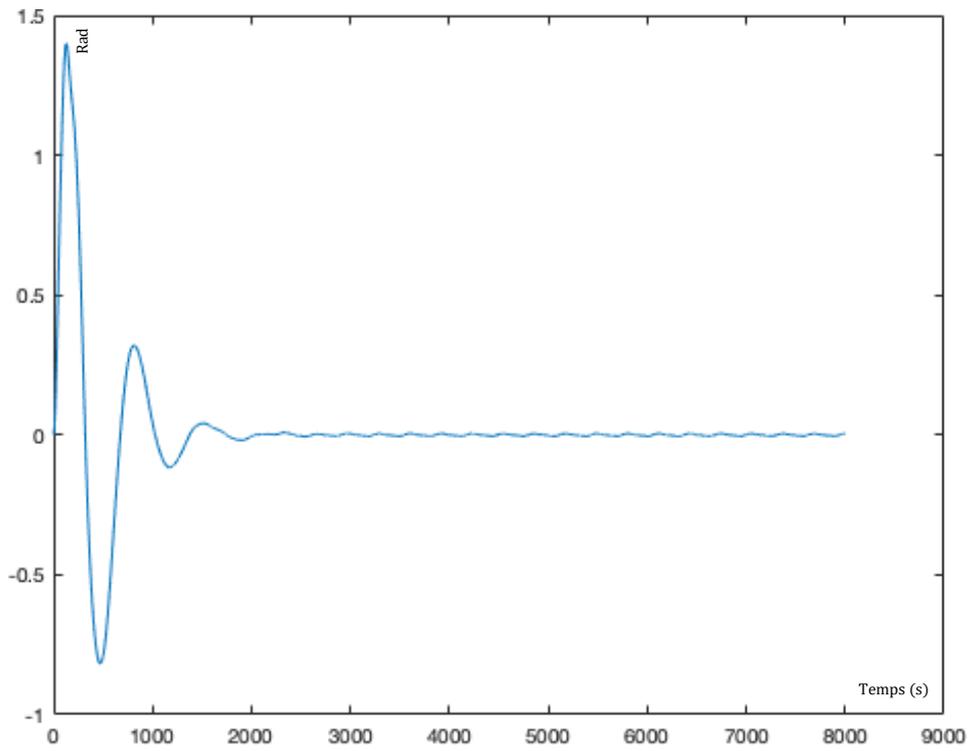


Figure III.19 : Erreur selon l'axe z.

III.6. Optimisation Par Essaims de Particule

L'optimisation par Essaim de particule (OEP) ou bien (PSO) est une technique utilisée pour explorer l'espace de recherche d'un problème quelconque pour trouver l'ensemble des paramètres qui maximise/minimise un objectif particulier. L'objectif est d'avoir les particules converge sur l'optimum de la fonction [58]. Cet objectif est atteint en suivant un algorithme dédié que l'on verra par la suite.

III.7. Principe du PSO

Un essaim est disposé de façon aléatoire et homogène dans l'espace de recherche et chaque particule possède la capacité de se déplacer avec une vitesse aléatoire [59]. Ainsi, à chaque pas de temps, chaque particule :

- Évalue la qualité de sa position et garde en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position atteinte jusqu'ici (elle peut être la position courante) et sa qualité (la valeur de la fonction à optimiser en cette position).
- Interroge un certain nombre de particules pour obtenir de chacune d'entre elles sa propre meilleure performance.

Choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, puis adapte sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

Le principe de la méthode d'essaim de particule est résumé par la figure (III.20). Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine trois tendances : suivre sa vitesse propre, revenir vers sa meilleure performance, aller vers la meilleure performance de ses informatrices.

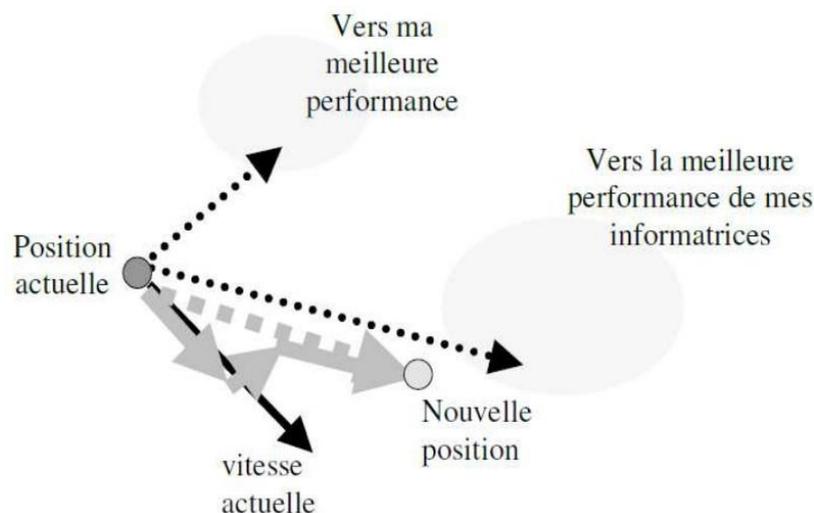


Figure III.20 : Schéma de principe du déplacement d'une particule.

Le principe de PSO développé par Kennedy et Eberhart se base sur le comportement des nuées d'oiseaux. Ainsi, le PSO a été fondamentalement développé à travers la simulation du comportement des nuées d'oiseaux dans l'espace bidimensionnel. La position de chaque agent (individu ou particule) est représentée par ses coordonnées suivant les deux axes XY auxquels on associe les vitesses exprimées par v_x (vitesse suivant l'axe X) et v_y (vitesse suivant l'axe Y). La modification du Comportement de chaque agent se base sur les informations de position et de vitesse. A chaque itération l'agent procède via une fonction objective à l'évaluation de sa meilleure valeur jusque-là (p_{best}) et sa position suivant les deux axes XY.

Cette information est obtenue à partir de l'analyse des expériences personnelles de chaque agent. En plus, chaque agent connaît la meilleure valeur globale du groupe (g_{best}) parmi les p_{best} . Cette information représente la valeur autour de laquelle d'autres agents sont performants. Ainsi, chaque agent essaye de modifier sa position en se basant sur les informations suivantes :

- Position courante (x, y).
- Vitesse courante (v_x, v_y).
- Distance entre la position courante et p_{best} .
- Distance entre la position courante et g_{best} .

Cette modification peut être représentée par le concept de vitesse. La vitesse modifiée de chaque agent s'écrira de la manière suivante :

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + C_1 rand1(X_{p_{best}i} - X_i^k) + C_2 rand2(X_{g_{best}i} - X_i^k) \quad (III.1)$$

Où :

- V^k : Vitesse de l'agent i à l'itération k .
- C_1 et C_2 : sont deux constantes d'accélération régulant les vitesses relatives par rapport aux meilleures positions locales et globales. Ces paramètres sont considérés comme des facteurs d'échelle utilisés pour déterminer les mouvements relatifs de la meilleure position de la particule ainsi que de la meilleure position globale. Ce sont des facteurs qui déterminent le degré d'influence des positions passées de la particule elle-même et celles des autres particules dans le swarm.
- Rand 1 et rand 2 : sont des variables aléatoires générés d'une distribution uniforme dans l'intervalle [0,1] afin de fournir un poids stochastique aux différentes composantes participant dans la définition de la vitesse de la particule.

Chapitre III Planification de trajectoire et évitement d'obstacle

- X_i^k : Position courante de l'agent i à l'itération k qui réfère à une solution candidate pour le problème d'optimisation considéré à l'itération k .
- X_{pbest} : La meilleure position locale de l'agent i
- X_{gbest} : la meilleure position globale identifiée dans le processus de recherche pour toutes les particules dans le swarm. La position optimale est mesurée avec une fonction dit fitness définit suivant le problème d'optimisation. Durant l'optimisation, les particules se déplacent suivant les équations (III.1) et (III.3).
- ω : Fonction de pondération, elle est utilisée comme un compromis entre l'exploration locale et globale du swarm. Des valeurs élevées de ce paramètre permettent une bonne exploration globale, tandis que pour des valeurs minimales une recherche fine est réalisée

La fonction de pondération habituellement utilisée dans l'équation (III.8) est la suivante :

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} iter \quad (III.2)$$

Avec:

- ω_{max} : Poids initial.
- ω_{min} : Poids final.
- $iter_{max}$: Nombre maximum d'itération.
- $iter$: Nombre courant d'itération.

La partie de droite de l'équation (III.1) comprend trois termes (vecteurs). Le premier terme représente la vitesse précédente de l'agent. Le second terme ainsi que le troisième sont utilisés pour modifier la vitesse de l'agent.

Le modèle utilisé dans l'équation (III.9) est appelé approche poids inertie « Inertia Weights Approach (IWA) ». La position courante est modifiée suivant l'équation ci-dessous :

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (III.3)$$

La figure (III.21) montre le concept de modification d'un point de recherche par le PSO alors que la figure (III.22) illustre un concept de recherche avec des agents dans un espace de solution. Chaque agent change sa position courante en moyennant l'intégration des vecteurs comme présentés dans la figure (III.22).

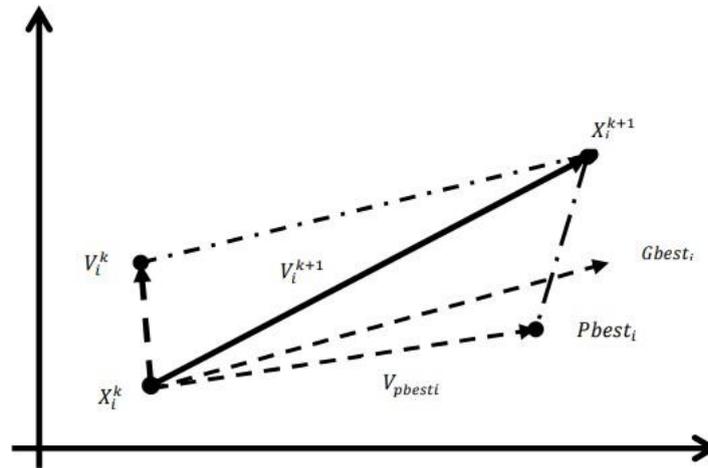


Figure III.21. Concept de modification d'un point de recherche par PSO.

Où :

- X_i^k : Position courante de l'agent.
- X_i^{k+1} : Position modifiée de l'agent.
- V_i^k : Vitesse courante de l'agent.
- V_i^{k+1} : Vitesse modifiée de l'agent.
- $V_{p_{best_i}}$: Vitesse de l'agent basée sur la position p_{best_i} .
- $V_{g_{best_i}}$: Vitesse de l'agent basée sur la position g_{best_i} choisi parmi toutes les meilleures positions des agents de la population

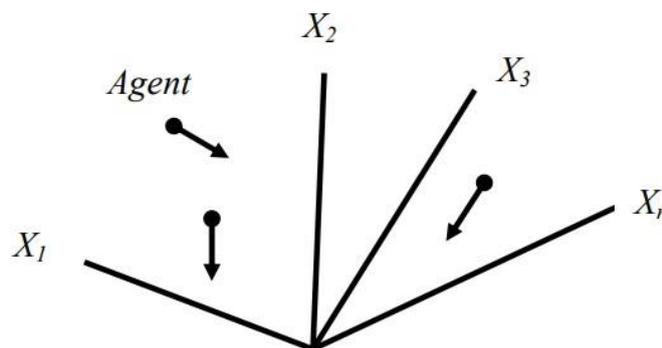


Figure III.22 : Concept de recherche avec des agents dans l'espace de solution par PSO.

III.8. Avantages et inconvénients de PSO

L'algorithme du PSO présente un avantage certain sur les méthodes classiques dans le sens où il permet une exploration aléatoire de l'espace de solution. De plus de sa simplicité à mettre en œuvre et son exécution conduit à l'obtention de très bon résultat, rapidement et facilement avec peu de paramètre à ajuster.

Bien que le PSO trouve de bonnes solutions dans un temps beaucoup plus court que d'autres algorithmes évolutionnaires, l'amélioration de la qualité des solutions ne peut être garantie en augmentant le nombre d'itération.

L'algorithme de PSO a deux inconvénients principaux :

- Le premier inconvénient est que l'essaim peut prématurément converger.
- Le deuxième inconvénient est que les approches stochastiques ont un problème de dépendance tout changement d'un de leurs paramètres peut avoir un effet sur le fonctionnement de l'algorithme tout comme sur la solution obtenue.

III.9. Domaines d'utilisation du PSO

L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) trouve de nombreuses applications dans divers domaines, avec une importance particulière en automatique et en intelligence artificielle (IA). En automatique, PSO est utilisé pour l'optimisation des contrôleurs PID, où il ajuste les paramètres pour améliorer les performances du système en termes de stabilité et de réponse dynamique. Il est également employé dans la conception et l'optimisation des systèmes de contrôle adaptatif et prédictif, permettant d'améliorer l'efficacité et la précision des processus industriels.

Dans le domaine de l'IA, PSO est largement utilisé pour l'optimisation des hyperparamètres des modèles de machine learning, tels que les réseaux de neurones, les machines à vecteurs de support et les forêts aléatoires. En clustering, PSO aide à déterminer les centres de clusters optimaux, améliorant la qualité des regroupements de données. En robotique, il optimise la planification de trajectoire et la coordination des mouvements de plusieurs robots, permettant une exécution fluide et coordonnée des tâches complexes. De plus, PSO est utilisé pour l'entraînement des réseaux de neurones, où il aide à minimiser les erreurs de prédiction en ajustant les poids et les biais du réseau.

III.10. Planification de trajectoire

- L'algorithme PSO

On utilise ces paramètres suivants :

- **Le npop** : c'est le nombre de particules dans l'essaim. Chaque particule représente une solution potentielle dans l'espace de recherche dans notre cas nous l'avons choisi = 20.
- **Le Maxit** : C'est le nombre maximum d'itérations que l'algorithme effectuera. Chaque itération représente un cycle où les particules mettent à jour leurs positions en fonction de leur propre expérience et de celle des autres particules dans notre algorithme nous l'avons fixé à 1000 itérations.

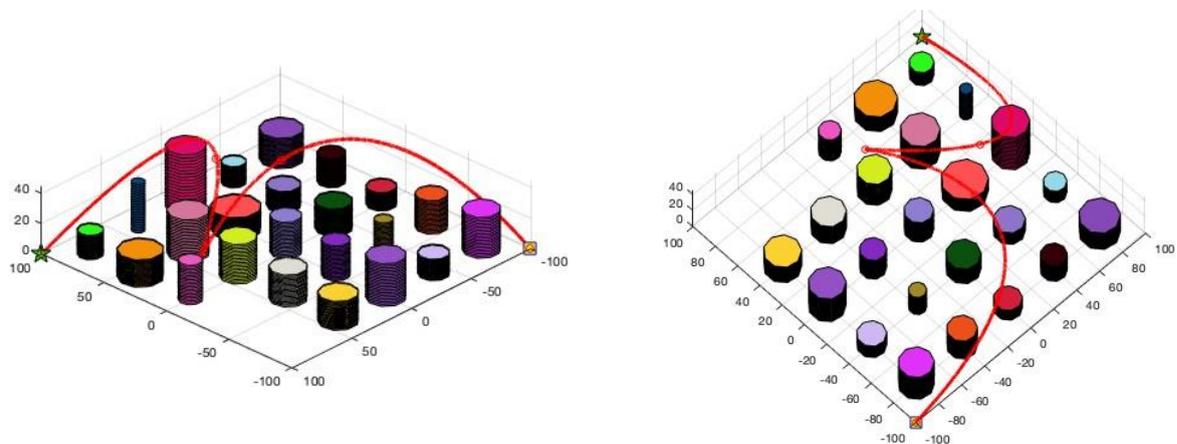


Figure III.23 : Trajectoire de la première itération du PSO.

Remarque : Plus le nombre de particules est élevé, plus l'algorithme a de chances de couvrir un vaste espace de recherche et plus le nombre d'itérations est élevé, plus l'algorithme a de chances de converger vers une solution optimale, mais cela augmente également le temps de calcul.

- Cette première itération nous a donné un cout de 417,2102 qui n'est pas optimal.

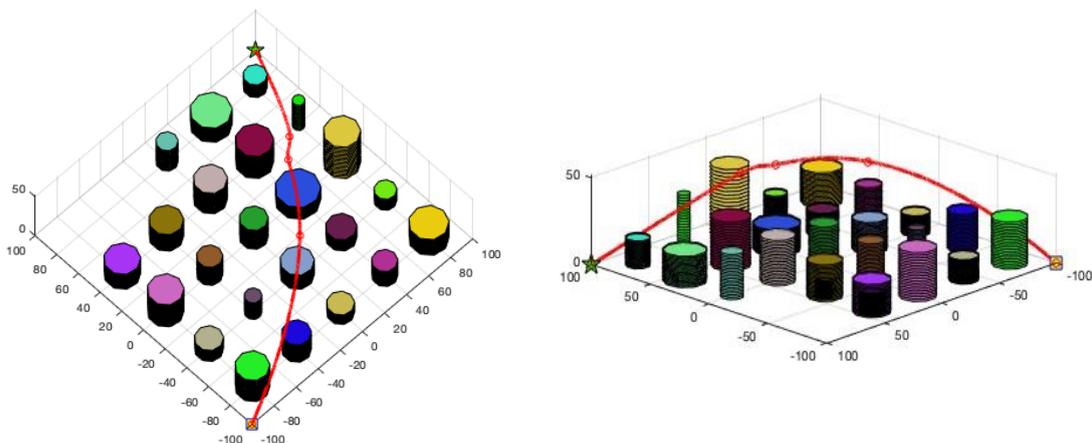


Figure III.24 : Trajectoire de la dernière itération du PSO.

- Contrairement à la première itération le coût est bien plus optimal qui est de 313,1846.

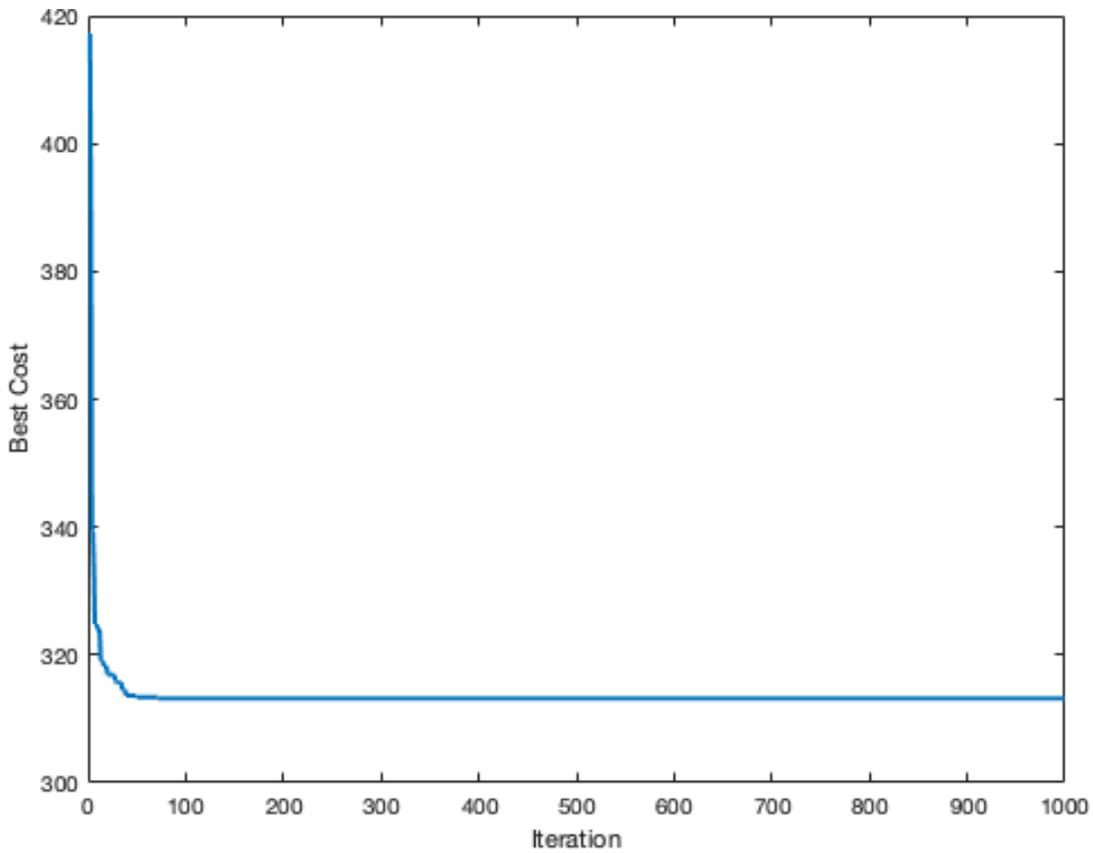


Figure III.25 : Graphe du rapport itération/coût.

III.11. Poursuite de trajectoire :

On présente dans les figures suivantes les résultats obtenus pour la poursuite de la trajectoire planifiée par l’algorithme en utilisant la commande PID.

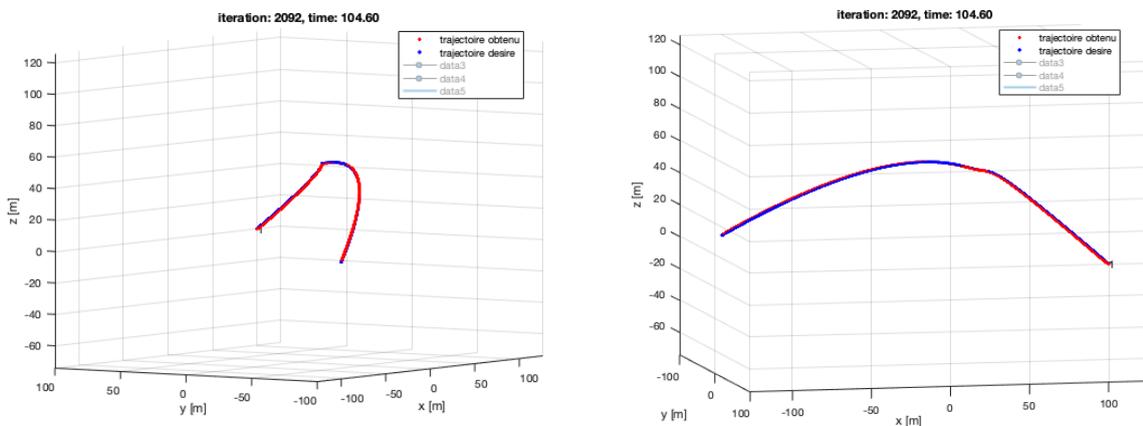


Figure III.26 : La poursuite de la trajectoire planifiée.

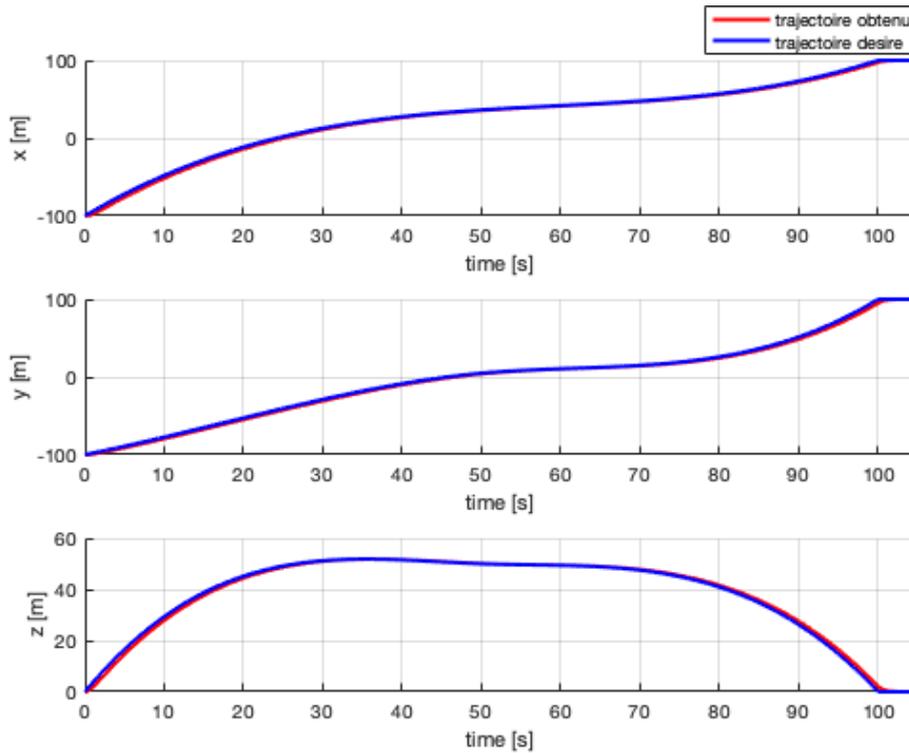


Figure III.27: Réponse selon x , y et z .

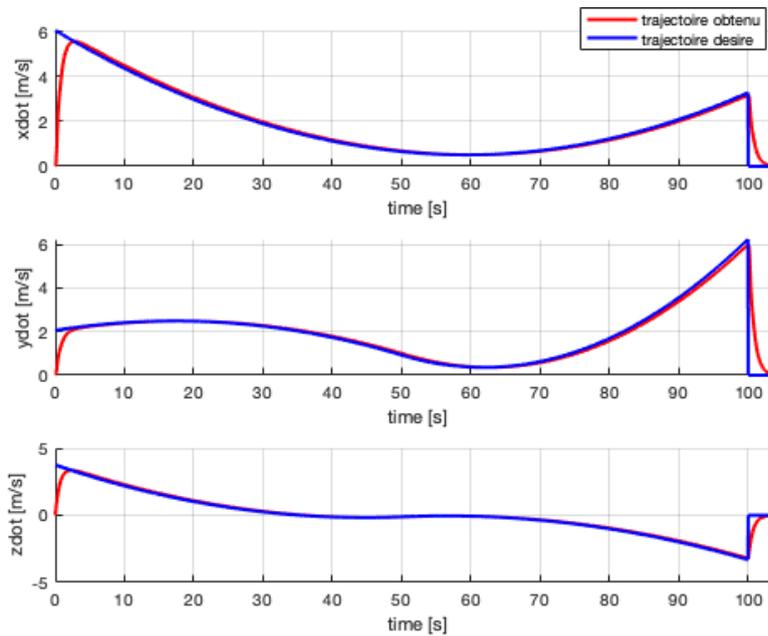


Figure III.28: réponse selon \dot{x} , \dot{y} et \dot{z} .

III.12. Allocation des tâches

III.12.1 les essais de drones

Dans certaines missions, la mise en œuvre d'un seul drone n'est pas efficace voir même impossible. Par exemple pour la recherche ou la surveillance sur de larges zones, un seul drone nécessiterait de

longues périodes de survol pour couvrir la zone alors même que son autonomie est limitée. Il semble alors plus pertinent d'utiliser un ensemble de drones, volant en flotte ou en essaim [60] [61].

Il ne s'agit toutefois pas ici de dupliquer un drone pour les faire voler en formation et constituer ainsi une caméra virtuelle à large champ de vision. Car comme dans la nature et dans les champs de recherche bio-inspirés, on peut envisager créer une intelligence de groupe à partir de cet essaim. Cette notion a d'ailleurs été popularisée dans une série télévisée mettant en scène des essaims d'insectes. L'intelligence de groupe passe souvent par un moyen de communication, comme dans le cas des abeilles ou des fourmis. Dans le cas de drones, nous considérerons ici la communication numérique sans fil. En comparaison d'un drone isolé qui communique principalement, si ce n'est exclusivement avec sa station de contrôle au sol, l'essaim de drones doit permettre en plus un ensemble de schémas de communication plus variés. La réalisation de la mission et son succès reposent sur la capacité à maintenir cette intelligence de groupe qui dépend directement de la disponibilité du moyen de communication.

III.10.2. Principe de l'allocation des tâches

Les applications de drones ont explosé au cours de la dernière décennie et, récemment, la disponibilité de matériel peu coûteux a éveillé l'intérêt pour les essaims aériens où plusieurs robots volants collaborent pour accomplir une tâche collective [1], [2]. Les avantages des systèmes multi-drones sont envisagés pour un large éventail de missions, y compris la recherche et le sauvetage [3], la surveillance à long terme [4], la collecte de données de capteurs [5], la navigation intérieure [6], l'exploration de l'environnement [7], et la préhension et le transport coopératifs [8]. Dans l'industrie du divertissement, le dernier défi est la coordination de flottes de centaines de drones qui illuminent le ciel nocturne avec des spectacles aériens, comme l'ont montré Intel' et Ehang.

Cependant, la première étape vers le déploiement de tels systèmes complexes dans des scénarios réels est la simulation [9]. Le développement d'algorithmes et d'applications pour les véhicules aériens autonomes nécessite la disponibilité d'un cadre de simulation approprié pour le prototypage rapide et la simulation dans des scénarios reproductibles. Ceci est souhaitable dans tous les domaines de la robotique, mais cela est particulièrement pertinent pour les systèmes collectifs tels que les essaims de drones, où les erreurs peuvent se propager à travers les individus et conduire à des résultats catastrophiques [10]. Bien que plusieurs frameworks open source existent pour simuler des robots aériens [11] [14], la majorité se concentre sur le réalisme d'un seul robot et ne peut pas gérer un grand nombre de drones en temps réel. D'un autre côté, les simulateurs qui supportent plusieurs robots n'implémentent pas la dynamique non linéaire du robot ou ils nécessitent l'interaction avec plusieurs

langages de programmation. En outre, il n'existe aucun framework fournissant des algorithmes de contrôle prêts à l'emploi, des outils de débogage et des fonctionnalités d'analyse des performances pour les essais aériens. L'utilisateur potentiel doit développer ses propres outils compatibles avec ceux choisis qui ne sont pas standards et sujets à l'erreur.

III.13. Problématique :

Donner plusieurs quêtes à accomplir pour un nombre de drones bien plus restreint en calculant toutes les paramètres importantes (cout, gain, énergie...) d'une façon optimale autrement dit choisir une tâche précise pour le drone le plus adéquat.

- **Solution optée :**

Nous allons voir une approche algorithmique pour cette problématique qui est dans notre exemple 100 missions pour 20 drones et l'affectation intelligente de chaque mission à chaque drone qui vont dépendre des paramètres cités dans la problématique Ce qui ressemble au problème du sac à dos.

L'objectif du problème du sac à dos :

Le problème d'optimisation du sac à dos, également connu sous le nom de "problème du sac à dos" ou "knapsack problem" en anglais, est un problème classique en informatique et en mathématiques. Il pose la question suivante : comment remplir un sac à dos d'une capacité donnée avec un ensemble d'objets de différentes valeurs et poids, de manière à maximiser la valeur totale des objets contenus dans le sac, tout en respectant la contrainte de capacité qui est dans notre cas l'énergie ? Formellement, le problème du sac à dos peut être défini comme suit : Étant donné un ensemble d'objets, chaque objet ayant une valeur et un poids spécifiques, et un sac à dos avec une capacité maximale, le but est de sélectionner les objets à placer dans le sac de manière à maximiser la valeur totale des objets sans dépasser la capacité du sac.

Programme utilisé :

```
% By BENAHMED Asma & LASLA Rayane
clc
clear all
close all
rng(1)
%%
% Coûts des tâches C=10*rand([1,100]); % 100 Tâches
% Bénéfice de chaque Tâche
B=100*rand([1,100]);
% Énergie disponible en chaque drone
E=randi(30,[1,20]); % 20 Drones
P=0.5*ones(1,100); % Probabilité
```

```

N=100; % paramètres
Best=zeros(1,100) % Aucune tache DBest=zeros(1,100)
Bbest=0; Evo=[];

for i=1:1000
BG1=0; CG1=0;BG2=0; CG2=0;
%creation des vecteur
G1=zeros(1,100); G2=zeros(1,100); D1=zeros(1,20); D2=zeros(1,20);
k=1; j=1;
while j<=100
if rand<=P(j)
G1(j)=1;
D1(j)=k;
BG1=BG1+B(j);%ajout de chaque nouveau benefice
CG1=CG1+C(j);%ajout de chaque nouveau cout
else
end
G1(j)=0;
D1(j)=0;
%si lenergie du drone est plus faible que le cout de la tâche, elle vas
etre affecter au prochain drone
if CG1>E(k)
G1(j)=0;
D1(j)=0;
k=k+1; CG1=0;
%sortir de la boucle si tout les drones sont atteint
if k>20
j=101;
end
end
j=j+1;
end
k=1; j=1;
while j<=100
if rand<=P(j)
G2(j)=1;
D2(j)=k;
BG2=BG2+B(j);%ajout de chaque nouveau benefice
CG2=CG2+C(j);%ajout de chaque nouveau cout
else end
G2(j)=0;
D2(j)=0 ;
%si lenergie du drone est plus faible que le cout de la tache, elle vas
etre affecter au prochain drone
if CG2>E(k)
G2(j)=0;
D2(j)=0;
k=k+1; CG1=0;
%sortir de la boucle si tout les drones sont atteint
if k>20
j=101;
end
end
j=j+1;
end BG1; BG2;
if BG1>BG2%comparaison pour le meilleur benefice
for L=1:100

```

```

if G1(L)==1&&G2(L)==0
P(L)=min(P(L)+1/N,1);%si g1 pris augmanter la plus petite probabilite
elseif G1(L)==0&&G2(L)==1
P(L)=max(P(L)-1/N,0);%si g2 pris diminuer la plus petite probabilite

end
end
if BG1>Bbest %comparaison
Best=G1; DBest=D1; Bbest=BG1;
else
end
for L=1:100
if G1(L)==1 && G2(L)==0
P(L)=max(P(L)-1/N,0);%si g1 pris diminuer la plus petite probabilite
elseif G1(L)==0&&G2(L)==1
P(L)=min(P(L)+1/N,1);%si g2 pris augmanter la plus petite probabilite
end
end
if BG2>Bbest %comparaison
Best=G2;
DBest=D2 Bbest=BG2;
end
end
Evo=[Evo Bbest];
end
Bbest Best DBest
loglog(Evo,'LineWidth',2)

```

Explication du code :

On attribue à tous les paramètres (le cout, le bénéfice, l'énergie, probabilité) des valeurs aléatoires. À l'aide de ces dernières on aura deux solutions possibles D1 et D2 pour les drones et G1 et G2 pour les tâches, commençant par prendre des valeurs aléatoires qui vont définir quelle tâche sera prise par quel drone en utilisant un raisonnement qui est : si la valeur générée est plus petite que sa probabilité la tâche est prise sinon ça ne va pas être le cas, en prenant compte aussi de l'énergie à fournir et l'énergie du drone si l'énergie à fournir est plus élevée que celle du drone la tâche reléguée au drone suivant ainsi de suite.

A chaque itération le bénéfice et le cout vont s'additionner pour avoir à la fin le bénéfice et le cout globale de toutes les tâches, et après l'obtention des solutions celles-ci vont être comparées pour choisir la meilleure qui va être attribuée à Best, Dbest et Bbest (la meilleure affectation des tâches aux drones).

Résultats de la simulation :

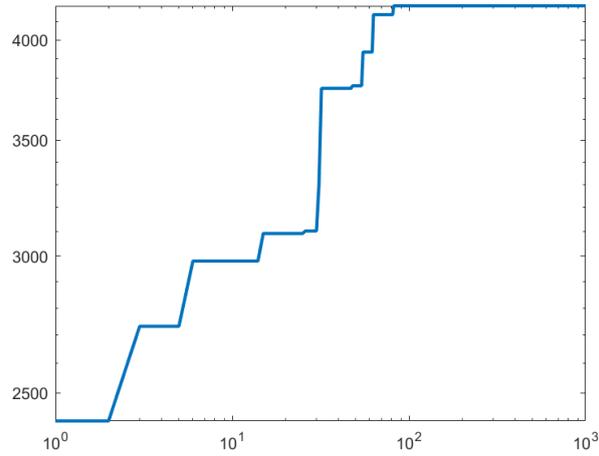


Figure III.29 : Itérations par rapport aux bénéfices.

```

Best =
Columns 1 through 18
  1  0  0  1  0  1  0  1  1  1  1  0  1  0  0  1  1  0
Columns 19 through 36
  1  1  1  0  1  1  0  1  1  1  1  0  1  1  0  1  1  0
Columns 37 through 54
  1  1  1  0  0  0  1  1  1  1  0  1  1  1  1  1  1  1
Columns 55 through 72
  1  1  0  1  1  1  1  1  1  0  1  1  0  1  1  1  0  1
Columns 73 through 90
  1  0  1  0  0  1  0  1  0  0  1  1  1  0  1  0  0  1
Columns 91 through 100
  1  0  1  0  1  1  1  0  1  0

DBest =
Columns 1 through 18
  1  0  0  1  0  1  0  1  1  1  1  0  2  0  0  2  2  0
Columns 19 through 36
  3  3  3  0  3  3  0  4  4  4  4  0  5  5  0  6  6  0
Columns 37 through 54
  7  7  7  0  0  0  8  8  8  8  0  9  9  9  9  9  9  9
Columns 55 through 72
  9  9  0  10  10  10  10  10  0  11  11  0  12  12  12  0  13
Columns 73 through 90
  13  0  14  0  0  16  0  16  0  0  18  18  18  0  18  0  0  18
Columns 91 through 100
  18  0  19  0  19  19  19  0  20  0

Bbest =
4.1857e+03
    
```

III.14. Conclusion

Durant ce chapitre nous avons expliqué la planification de trajectoire comme on a présenté la commande PID ainsi que l'algorithme PSO et son principe.

On a vu la planification de trajectoire du drone dans un milieu présentant des obstacles. La poursuite de trajectoire est assurée par le contrôleur PID.

On a étudié la trajectoire d'un drone en évitant des obstacles comme on a fait une analyse le principe des résultats de l'allocation des tâches qui est dans notre cas un système de répartition de tâches hétérogène.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a présenté notre travail qui est concentré sur l'allocation de tâche pour un essaim de drone.

Dans le premier chapitre, nous avons fait une étude générale des drones (description des UAV, historique, domaine d'application, les catégories ...), nous avons également abordé en particulier des généralités sur les quadrotors qui fait l'objet de notre étude et les techniques de commande pour ce dernier.

Dans la deuxième partie de ce travail on s'est intéressé sur la modélisation dynamique d'un quadrotor ce processus consiste à créer un modèle mathématique et physique du comportement et des caractéristiques de vol de cet engin.

Dans la troisième partie qui est la dernière de ce travail on a abordé la notion de la planification de trajectoire On s'est intéressé à l'utilisation de la méthode PSO pour la planification de trajectoire du quadrotor.

En somme, ce mémoire a permis de mieux comprendre le fonctionnement des UAV en générale et les quadrotors en particulier et aussi de trouver la meilleure trajectoire optimale en utilisant l'algorithme PSO.

Références Bibliographique

Références bibliographiques :

- [1] Hazry Desa, « Adaptive Hybrid Control Algorithm Design for Attitude Stabilization of Quadrotor (UAV) », Archives Des Sciences Vol 66, N°. 2, University Malaysia Perlis, Malaysia, 2013.
- [2] <https://www.techtarjet.com/iotagenda>
- [3] Le parisien, <http://www.leparisien.fr/high-tech/1-histoire-du-drone-raconteepar-son-inventeur-13-02-2015-4530761.php>, consulté le 14-6-201).
- [4] Bouabdallah, Samir. (2007). Design and Control of quadrotors with application to autonomous flying. 10.5075/epfl-thesis-3727.
- [5] Arthur Huber. Death by a thousand cuts: micro-air vehicles in the service of air force missions. Technical report, Air War College, 2001.
- [6] Akira Sato. Research, development and civil application of an autonomous, unmanned helicopter. Unmanned Vehicle Systems International, www.uvs-international.org.
- [7] RFI. Le monde change, 02/07/04, 2004.
- [8] American journal of engineering research (AJER)
- [9] B. Coifman, M. McCord, M. Michalani, and K. Redmill, Surface Transportation Surveillance from Unmanned Aerial Vehicles, Proc. of 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2004.
- [10] Hanford, Scott D, Lyle N Long et Joseph F Horn. 2005. « A small semi-autonomous rotarywing unmanned air vehicle (UAV) ». AIAA2005-7077.
- [11] Leishman, J Gordon. 2000. « A history of helicopter flight ». The University of Maryland [online].
- [12] Bouadi, H, M Bouchoucha et M Tadjine. 2007a. « Modelling and Stabilizing Control Laws Design Based on Sliding Mode for an UAV Type-Quadrotor ». Engineering Letters, vol. 15, no 2, p. 342-347.
- [13] Guerrero-Castellanos, JF. 2008. « Estimation de l'attitude et commande borne en attitude d'un corps rigide: Application à un hélicoptère à quatre rotors ». Ph. D dissertation, Joshep Fourier University, Grenoble, France.

Références bibliographique

- [14] Bouabdallah, Samir. 2007. « Design and control of quadrotors with application to autonomous flying ». École Polytechnique federale de Lausanne.
- [15] Madani, Tarek, et Abdelaziz Benallegue. 2006. « Control of a quadrotor mini-helicopter via full state backstepping technique ». In Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on. p. 1515-1520. IEEE.
- [16] Madani, Tarek, et Abdelaziz Benallegue. 2007. « Sliding mode observer and backstepping control for a quadrotor unmanned aerial vehicles ». In American Control Conference, 2007. ACC'07. p. 5887-5892. IEEE.
- [17] Huang, Mu, Bin Xian, Chen Diao, Kaiyan Yang et Yu Feng. 2010. « Adaptive tracking control of underactuated quadrotor unmanned aerial vehicles via backstepping ». In American Control Conference (ACC), 2010. p. 2076-2081. IEEE.
- [18] Colorado, Julián, Antonio Barrientos, Alexander Martinez, Benjamin Lafavergeres et João Valente. 2010. « Mini-quadrotor attitude control based on Hybrid Backstepping & Frenet-Serret theory ». In Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. p. 1617-1622. IEEE.
- [19] Wang, Jian, Thomas Raffler et Florian Holzapfel. 2012. « Nonlinear position control approaches for quadcopters using a novel state representation ». In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference.
- [20] Shim, H, Tak John Koo, Frank Hoffmann et Shankar Sastry. 1998. « A comprehensive study of control design for an autonomous helicopter ». In In: Proc. 37th IEEE Conf. on Decision and Control (CDC'98. Citeseer.
- [21] Tayebi, A, et S McGilvray. 2004. « Attitude stabilization of a four-rotor aerial robot ». In Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on. Vol. 2, p. 1216-1221. IEEE.
- [22] Lipera, Larry, Jason D Colbourne, Mark B Tischler, M Hossein Mansur, Michael C Rotkowitz et Paul Patangui. 2001. « The micro craft iSTAR micro air vehicle: control system design and testing ». In ANNUAL FORUM PROCEEDINGS-AMERICAN HELICOPTER SOCIETY. Vol. 57, p. 1998-2008. AMERICAN HELICOPTER SOCIETY, INC.
- [23] Güçlü, Anil. 2012. « Attitude and altitude control of an outdoor quadrotor ». ATILIM UNIVERSITY.
- [24] Edwards, Christopher, et Sarah Spurgeon. 1998. Sliding mode control: theory and applications. CRC Press.

Références bibliographique

- [25] McGeoch, DJ, EW McGookin et SS Houston. 2005. « MIMO sliding mode attitude command flight control system for A helicopter ». In AIAA-6350 Guidance, Navigation, and Control conference and exhibit, San Francisco, California. p. 15-18.
- [26] Bouabdallah, Samir, et Roland Siegwart. 2005. « Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor ». In Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. p. 2247-2252. IEEE.
- [27] Xu, Rong, et Ümit Özgüner. 2006. « Sliding mode control of a quadrotor helicopter ». In Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on. p. 4957-4962. IEEE.
- [28] Bouadi, H, M Bouchoucha et M Tadjine. 2007b. « Sliding mode control based on backstepping approach for an UAV type-quadrotor ». World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 26, no 5, p. 22-27.
- [29] Mahony, Robert, et Tarek Hamel. 2004. « Robust trajectory tracking for a scale model autonomous helicopter ». International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 14, no 12, p. 1035-1059.
- [30] Kendoul, Farid, David Lara, Isabelle Fantoni et R Lozano. 2007. « Real-time nonlinear embedded control for an autonomous quadrotor helicopter ». Journal of guidance, control, and dynamics, vol. 30, no 4, p. 1049-1061.
- [31] Pflimlin, JM, P Soueres et T Hamel. 2007. « Position control of a ducted fan VTOL UAV in crosswind ». International Journal of Control, vol. 80, no 5, p. 666-683.
- [32] Ioannou, Petros A, et Jing Sun. 1984. « Robust adaptive control ». In American Control Conference. p. 1574-1578.
- [33] Li, Zhong-Hua, et Miroslav Krstić. 1997. « Optimal design of adaptive tracking controllers for nonlinear systems ». In American Control Conference, 1997. Proceedings of the 1997. Vol. 2, p. 1191-1197. IEEE.
- [34] Amieur, Toufik, et Mohamed Boumehraz. 2014. « Commande Adaptative Floue avec Mode de Glissement des Systèmes Non Linéaires ».
- [35] El Kari, A, N Essounbouli et A Hamzaoui. 2003. « Commande adaptative floue robuste: Application à la commande en poursuite d'un robot ». Internatinal Journal in Physics and Chemistry, réf N, vol. 611.

Références bibliographique

- [36] Shaiful, Zairi, et Desa Hazry. 2011. « Adaptive neural controller implementation in autonomous mini aircraft quadrotor (AMAC-Q) for attitude control stabilization ».
- [37] Bouadi, H, M Bouchoucha et M Tadjine. 2007b. « Sliding mode control based on backstepping approach for an UAV type-quadrotor ». *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 26, no 5, p. 22-27.
- [38] Teel, Andrew R. 1996. « A nonlinear small gain theorem for the analysis of control systems with saturation ». *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 41, no 9, p. 1256- 1270.
- [39] Isidori, Alberto, Doctor Lorenzo Marconi et Doctor Andrea Serrani. 2003. « Robust nonlinear motion control of a helicopter ». In *Robust Autonomous Guidance*. p. 149- 192. Springer.
- [40] Lozano, R, P Castillo et A Dzul. 2004. « Stabilization of a mini rotorcraft having four rotors ». In *Proceedings of*. p. 2693-2698.
- [41] Hamdan, Majed, et Zhiqiang Gao. 2000. « A novel PID controller for pneumatic proportional valves with hysteresis ». In *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*. Vol. 2, p. 1198-1201. IEEE.
- [42] Hall, C, AS Hodel et JY Hung. 2001. « Variable-structure PID control to prevent integrator windup ». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no 2, p. 442-451.
- [43] Aguilar-Ibañez, Carlos, Juan C Martinez-Garcia et Alberto Soria-López. 2011. « Bounded control based on saturation functions of nonlinear under-actuated mechanical systems: the cart-pendulum system case ». In *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on*. p. 1759-1764. IEEE.
- [44] T. Madan, and A. Benallegue, “Backstepping control for a quadrotor helicopter,” in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China*, pp.3255-3260, 2006.
- [45] T. Madani, and A. Benallegue, “Control of a quadrotor mini-helicopter via full state backstepping technique,” in: *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA*, pp. 1515–1520, 2006.
- [46] M. Fliess, C. Join, M. Mboup, and Sira-Ramírez H., “vers une commande multivariable sans modèle,” *Actes Conf. Internat. Francoph. Automatique (CIFA 2006), Bordeaux*, 2006.

Références bibliographiques

- [47] C. Join, J. Masse, M. Fliess, "Etude préliminaire d'une commande sans modèle pour papillon de moteur," *J. europ.syst. automat.*, vol. 42, pp. 337-354, 2008.
- [48] A Model-free Control Applied to a Quadrotor - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Exemple-dun-systeme-quadrirotor-II-MODELISATION-DYNAMIQUE-DU-QUADRIROTOR-La_fig1_301788688 [accessed 3 Jul, 2024]
- [49] H. Bouadi, M. Bouchoucha, and M. Tadjine, "Sliding mode control based on backstepping approach for an UAV Type-Quad-rotor," *international journal of applied mathematics and computer sciences*, vol.4, no.1, pp.12-17, 2007.
- [50] Cowling, Ian D., et al. "A prototype of an autonomous controller for a quadrotor UAV." 2007 European Control Conference (ECC). IEEE, 2007.
- [51] Khatoon, Shahida, Mohammad Shahid, and Himanshu Chaudhary. "Dynamic modeling and stabilization of quadrotor using PID controller." 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). IEEE, 2014.
- [52] P. Bouvry et al., "Using heterogeneous multilevel swarms of UAVs and high-level data fusion to support situation management in surveillance scenarios," in 2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 2016, pp. 424–429.
- [53] C. Goerzen, Z. Kong, and B. Mettier, "A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance," *Intell. Robotics Syst.*, vol. 57, 2010, pp. 65-100.
- [54] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems », Springer, 2005.
- [55] A. Hadad, optimization des coefficients du régulateur PID par Essaim de particule d'un processus chimique, Mémoire de master, département d'électrotechnique, université de Sétif, 2013.
- [56] Goldberg, D.E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley, 1989.
- [57] O.Aidan, « handbook of PI and PID controller tuning rules 1 », published by Imperial College Press, 2006.
- [58] M. A. Nekoui, M. A. Khameneh and M. Kazemi, «Optimal design of PID controller for a CSTR system using particle swarm optimization», 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC, Tehran-Iran, pp.63-66, 2010.
- [59] M. Schwaab *et al.* Estimation des paramètres non linéaires grâce à l'optimisation des essaims de particules *Chim. Ing. Sci.* (2008)

Références bibliographique

- [60] J. Modares, F. Ghanei, N. Mastrorarde, and K. Dantu, “Ub-anc planner: Energy efficient coverage path planning with multiple drones,” in 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 6182–6189, 2017.
- [61] C. Ju and H. I. Son, “Multiple uav systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation,” *Electronics*, vol. 7, no. 9, 2018.
- [62] D. Floreano and R. J. Wood, “Science, technology and the future of small autonomous drones,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 460–466.
- [63] F. Schilling, J. Lecoer, F. Schiano, and D. Floreano, “Learning vision-based flight in drone swarms by imitation,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 4523–4530, 2019.
- [64] M. Bernard, K. Kondak, I. Maza, and A. Ollero, “Autonomous transportation and deployment with aerial robots for search and rescue missions,” vol. 28, no. 6, pp. 914–931, 2011.
- [65] J. Zhang, J. Hu, J. Lian, Z. Fan, X. Ouyang, and W. Ye, “Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as atool for long-term forest monitoring,” vol. 198, pp. 60–69, 2016.
- [66] A. T. Erman, L. van Hoesel, P. Havinga, and J. Wu, “Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with uavs for mission-critical management,” vol. 15, no. 6, pp. 38–46, 2008.
- [67] T. Stirling, J. Roberts, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, “Indoor navigation with a swarm of flying robots,” in 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2012, pp. 4641–4647.
- [68] K. N. McGuire, C. D. Wagter, K. Tuyls, H. J. Kappen, and G. C.H. E. de Croon, “Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment,” *Science Robotics*, vol. 4, no. 35, p. eaaw9710, 2019.
- [69] D. Mellinger, M. Shomin, N. Michael, and V. Kumar, “Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors,” in *Distributed autonomous robotic systems*, 2013, pp. 545–558.
- [70] P. S. Andrews, S. Stepney, and J. Timmis, “Simulation as a scientific instrument,” in *Proceedings of the 2012 workshop on complex systems modelling and simulation*, Orleans, France, 2012.
- [71] B. Huang, C. Yu, and B. D. O. Anderson, “Understanding Error Prop-agation in Multihop Sensor Network Localization,” vol. 60, no. 12, pp. 5811–5819, 2013.

Références bibliographique

[72] J. Meyer, A. Sendobry, S. Kohlbrecher, U. Klingauf, and O. von Stryk, “Comprehensive simulation of quadrotor uavs using ros and gazebo,” in 3rd Int. Conf. on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots (SIMPAN), 2012.

Résumé- L'objectif de ce travail est d'étudier l'allocation de tâches pour un essaim de drone. Pour cela on a passé par plusieurs étapes. Après un état de l'art sur les systèmes des véhicules aérien sans pilote (UAV), nous avons élaboré le modèle complet du quadrotor qui permet d'étudier son comportement dans les différents régimes de fonctionnement et puisque la dynamique de ce dernier est fortement linéaire et pleinement couplée, la modélisation des quadrotors est une tâche délicate. Puis nous avons fait une étude sur la planification de trajectoire et évitement d'obstacle comme on a étudié le principe d'allocation des tâches pour un système qui est dans notre cas un system hétérogène.

Mots clés : **Allocation des tâches, Modélisation de quadrotors, Drones, Robotique autonome, Optimisation de trajectoires.**

Abstract- The objective of this work is to study the task allocation for a drone swarm. To do this, we went through several stages. After a state of the art on the systems of unmanned aerial vehicles (UAV), we have developed the complete model of the quadrotor which makes it possible to study its behavior in the different operating regimes and since the dynamics of the latter is strongly linear and fully coupled, modelling quadrotors is a tricky task. Then we did a study on trajectory planning and obstacle avoidance as we studied the principle of task allocation for a system which is in our case a heterogeneous system.

-ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تخصيص المهام لسرب الطائرات بدون طيار. لتحقيق ذلك، مررنا بعدة مراحل. بعد الدراسة الأولية، قمنا بتطوير النموذج الكامل للطائرة الرباعية (UAV) التي تُمكن التطورات في أنظمة المركبات الجوية غير المأهولة من دراسة سلوكها في أنظمة التشغيل المختلفة. وبما أن ديناميكيات الأخيرة خطية بقوة ومُقرنة بالكامل، فإن نمذجة الطائرة الرباعية مهمة صعبة. بعد ذلك، قمنا بدراسة حول تخطيط المسار وتجنب العقبات، حيث درسنا مبدأ تخصيص المهام لنظام يُعتبر في حالتنا نظامًا غير متجانس.