

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**

**Université Abderrahmane Mira**

**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 système

### **Thème**

**Utilisation de l'intelligence des plantes pour le développement d'une méthode de planification de trajectoire pour un drone**

**Préparé par :**

M<sup>lle</sup>. MEDJAHED Samia

M<sup>r</sup> . KHIRI Lounis

**Examiné par :**

M<sup>r</sup>. HADDAR.H

Prof. GUENOUNOU.O

**Dirigé par :**

Dr. TIGHZERT Lyes

**Année universitaire : 2021/2022**

# Remerciements

*On remercie Dieu le tout-puissant, qui nous a donné la force et la patience pour l'accomplissement de ce travail.*

*Nous remercions en particulier Dr. **Lyes TIGHERT** pour l'honneur qu'il nous a fait de bien vouloir nous encadrer, et de nous faire profiter pleinement de ces compétences scientifiques et de ses idées ainsi que les conseils donnés pour l'accomplissement de ce travail .*

*On adresse nos remerciements aux membres de jury **M. Haddar.H** et **M. QUENOUNOU.O** pour avoir accepté de nous prêter de leur attention et évaluer notre travail.*

## Dédicace

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents :*

*Ma mère : Djamila qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père : Arezki qui est fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mes sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité : Sabrina et son mari Yacine et leurs petite fille Maylis, Sonia et son mari Zahir et Yamina et son mari Razik et leurs enfants la petite Eléna et l'ange Massi ainsi ma sœur Kahina et son mari Idris.*

*Mon grand-père maternel : Mouloud.*

*Mes oncles : Nadji et sa famille et leZarbi et sa famille.*

*Mes tante : Naima, Hasibba, Farida, Malika et Dalila ainsi leurs familles  
À la mémoire de mes grands-parents paternels, Djida ouiza et mes deux chers oncles Wahab et Mohand, qui ont été une joie qui nous manque énormément aujourd'hui et je demande à Dieu d'avoir pitié d'eux et d'habiter au paradis*

*A tous mes cousines et mes cousins particulièrement : Rayan et Younes*

*A tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu et qui ont été toujours à mes cotés avec leurs aides morales et leurs encouragements*

*A tous mes copines particulièrement : Felleli , Dihia*

*A tous mes amis particulièrement : mon meilleure collègue et ami : Lounis*

*Samia Medjahed*

## *Dédicace*

*Je dédie ce noble travail :*

*À mon père Hafid et à ma mère Rekia qui m'ont soutenu et encouragé dans les moments les plus difficiles.*

*À mes frères : Fahim, Samir et leurs femmes: Hakima et Radia .*

*À mes sœurs : Karima, Noura, Anissa, Thiziri et leurs familles ainsi que ma petite sœur Mélissa.*

*Aux adorables : Faiz , Ikram , Maroua , Diana, Dalida, Aksel, Ania, Farah et Sarah .*

*À toute ma famille et à tous mes amis en particulier : Ali, Madjid , Zoubir, Ferkous Canada , Riad, Amine, Lyes, Mani , Louhab, Lounis et Ahmed, sans oublier ma collègue et amie Samia.*

*Khiri Lounis*

# Sommaires

**LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES FIGURES**

**INTRODUCTION GENERALE** 13

## Chapitre I

<b>I.1. Introduction</b>	<b>17</b>
<b>I.2. Optimisation classiques et métaheuristique</b>	<b>18</b>
<b>I.3. Les algorithmes métaheuristique</b>	<b>18</b>
<b>I.4. Algorithmes d'optimisation inspirés de l'intelligence des plantes</b>	<b>21</b>
<b>I.4.1. Algorithme de Pollinisation Des Fleurs (FPA)</b>	<b>21</b>
<b>I.4.1.1. Description de processus de pollinisation chez les fleurs</b>	<b>22</b>
<b>I.4.1.2. Caractéristiques de la pollinisation des fleurs</b>	<b>22</b>
<b>I.4.1.3. La formulation de l'algorithme FPA</b>	<b>24</b>
<b>I.4.1.3.1. Recherche globale de FPA</b>	<b>24</b>
<b>I.4.1.3.2. Recherche locale d'FPA</b>	<b>25</b>
<b>I.4.1.3.3. Probabilité de commutation dans FPA</b>	<b>25</b>
<b>I.4.1.4. Application et variantes d' (FPA)</b>	<b>27</b>
<b>I.4.2. Algorithm Invasive weed optimization (IWO)</b>	<b>27</b>
<b>I.4.2.1. Définition</b>	<b>27</b>
<b>I.4.2.2. Les catégories des herbes envahissantes</b>	<b>28</b>
<b>I.4.2.2.1. Les plantes annuelles</b>	<b>28</b>
<b>I.4.2.2.1.1. Les annuelles d'été</b>	<b>29</b>
<b>I.4.2.2.1.2. Les annuelles d'hiver</b>	<b>29</b>

I.4.2.2.2. Les bisannuelles	29
I.4.2.2.3. Les vivaces	29
I.4.2.3. La formulation de l'algorithme IWO	30
I.4.2.4. Les application de IWO	34
I.5. Analyse de performance des algorithmes FPA et IWO	34
I.5.1. Interprétation les résultats	38
I.6. Conclusion	39

## Chapitre II

II.1. Introduction	41
II.2. Définition d'un drone	41
II.3. L'évolution des drones	42
II.3.1. Prémices des premiers drones	42
II.3.2. L'entre-deux guerres	42
II.3.3. La guerre du Vietnam	43
II.3.4. Les années 1990	44
II.3.5. Aujourd'hui	44
II.4. Classification des drones	45
II.4.1. Les drones à voilure fixe	45
II.4.2. Les drones à voilure tournante	45
II.4.3. Les drones à ailes battantes	45
II.5. Le Quadrotor	46
II.5.1. Le Fonctionnement du quadrotor	47
II.5.2. Le sens de rotation et les mouvements de quadrotor	48
II.5.2.1. Mouvement de roulis	84

II.5.2.2. Mouvement de tangage	49
II.5.2.3. Mouvement de lacet	49
II.5.2.4. Mouvement vertical	50
II.5.2.5. Mouvement horizontal	50
II.6. Modèle dynamique du quadrotor	51
II.6.1. Orientations et matrices de rotations	51
II.6.2. Angles d'Euler	52
II.6.3. Les Vitesses angulaires	53
II.6.4. Effets physiques agissants sur le quadrotor	54
II.6.4.1. Les force	54
II.6.4.1.1. Le poids du quadrotor	54
II.6.4.1.2. Les force de poussée	54
II.6.4.1.3. La force totale générée par les quatre rotors	54
II.6.4.1.4. La force de traînée	54
II.6.4.2. Les moments	55
II.6.4.2.1. Moment de portance	55
II.6.4.2.2. Moment du aux forces de traînée	56
II.6.4.2.3. Moment gyroscopique	57
II.7. Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler	57
II.7.1. Equations de mouvement de translation	58
II.7.2. Dynamique de rotation	59
II.8. Dynamique des rotors	60
II.9. La Règlementation sur l'utilisation des drones	62
II.10. Conclusion	63

## Chapitre III

III.1. Introduction	65
III.2. Définition de la planification de trajectoire	66
III.2.1. Les différents aspects de la planification	66
III.2.2. Types de méthodes de planification de trajectoire	67

III.2.2.1. Les méthodes de planification en ligne	67
III.2.2.1.1. Méthode de planification de trajectoire géométrique	67
III.2.2.2. Les méthodes de planification hors ligne	67
III.2.2.3. Les Méthodes de planification hors ligne et en ligne	68
III.2.2.3.1. Multi-Objective path planning method	68
III.3. La commande PID	68
III.3.1.Introduction	68
III.3.2.Modélisation sous Simulink du Quadrotor	68
III.3.3.La stabilité de quadrotor	70
III.3.3.1.Description d'un contrôleur PID	71
III.3.3.2.L'équation d'un PID	71
III.3.4. Les gains des contrôleurs PID	72
III.3.5.Résultats obtenus	73
III.3.6.Interprétation des résultats	73
III.4.Méthode PSO	80
III.5.Planification de trajectoire	80
III.5.1.Résultats et discussion	81
III.5.2.Interprétation des résultats	84
III.6.Poursuite de trajectoire	86
III.6.1.Interprétation des résultats	99
III.7.Conclusion	100

## Liste Des Tableaux

<b>Tableau I.2:</b> La Pollinisation et ses composants d'optimisation.	23
<b>Tableau I.3:</b> Certains des termes clés utilisés dans IWO	31
<b>Tableau I.4 :</b> Les paramètres utilisés par l'algorithme IWO	38
<b>Tableau I.5 :</b> Les différents paramètres utilisés pour l'algorithme FPA	38
<b>Tableau III.1 :</b> les paramètres de gain pour un PID optimisé.	72
<b>Tableau III.2 :</b> Les paramètres de l'algorithme PSO	80
<b>Tableau III.3:</b> La moyenne des erreurs.	99

## Liste Des Figures

<b>Figure I.1 :</b> les deux catégories de la métaheuristique	20
<b>Figure I.2:</b> Auto-pollinisation.	22
<b>Figure I.3:</b> Pollinisation croisée.	23
<b>Figure I.4:</b> pseudo-code de l'algorithme FPA	26
<b>Figure I.5:</b> L'algorithme FPA	27
<b>Figure I.6:</b> Les mauvaises herbes (adventices)	28
<b>Figure I.7 :</b> Les plantes annuelles d'été	28
<b>Figure I.8 :</b> Les bisannuelles	29
<b>Figure I.9:</b> Les vivaces	29
<b>Figure I.10 :</b> organigramme d'un algorithme IWO	32
<b>Figure I.11:</b> L'algorithme IWO	34
<b>Figure I.12:</b> les caractéristiques de trois fonctions	36
<b>Figure I.13:</b> La simulation de trois fonctions par les deux algorithmes (FPA et IWO)	37
<b>Figure II.1 :</b> La forme d'un drone.	41
<b>Figure II.2 :</b> Vue aérienne de Labruguière en 1889.	42
<b>Figure II.3 :</b> OQ-2 parmi des premiers drones en 1941.	43
<b>Figure II.4:</b> Différents modèles du Ryan 147 (de gauche à droite : 147J, H, G, NX).	43
<b>Figure II.5:</b> RQ-1 Predator Drone.	44
<b>Figure II.6 :</b> Différents modèles de drones.	44

<b>Figure II.7:</b> Les différents types de drones civils et militaires.	44
<b>Figure II.8:</b> Drones à voilure fixe.	45
<b>Figure II.9 :</b> Drones à voilure tournante	45
<b>Figure II.10:</b> Drones à ailes battantes.	46
<b>Figure II.11:</b> le Quadrotor.	47
<b>Figure II.12 :</b> Sens de rotation des hélices d'un quadrotor.	47
<b>Figure II.13 :</b> La Structure générale d'un quadrotor.	48
<b>Figure II.14 :</b> Illustration du mouvement de roulis.	49
<b>Figure II.15 :</b> Illustration du mouvement de tangage	49
<b>Figure II.16 :</b> Illustration du mouvement de lacet.	50
<b>Figure II.17:</b> Illustration du mouvement vertical	50
<b>Figure II.18:</b> Illustration du mouvement horizontal	51
<b>Figure II.19 :</b> La rotation autour de l'axe X(Roulis), l'axe Y(Tangage) et l'axe Z(Lacet)	52
<b>Figure II.20 :</b> le moment de portance	56
<b>Figure II.21:</b> le moment de trainée	57
<b>Figure II.22:</b> le modèle dynamique de quadrotor	62
<b>Figure III.1:</b> simulation des accélérations angulaires	69
<b>Figure III.2:</b> simulation de déplacement	70
<b>Figure III.4:</b> L'architecture parallèle d'un contrôleur PID	73
<b>Figure III.5:</b> La Trajectoire spirale	73
<b>Figure III.6:</b> La réponse en position <b>x</b>	74
<b>Figure III.7:</b> La réponse en position <b>y</b>	74
<b>Figure III.8:</b> La réponse en altitude <b>z</b>	75
<b>Figure III.9:</b> La réponse en altitude <b>phi</b>	75
<b>Figure III.10:</b> La réponse en altitude <b>teta</b>	76
<b>Figure III.11:</b> La réponse en altitude <b>psi</b>	76
<b>Figure III.12:</b> L'erreur de poursuite <b>ex</b>	77
<b>Figure III.13:</b> L'erreur de poursuite <b>ey</b>	77

<b>Figure III.14:</b> L'erreur de poursuite <b>ez</b>	78
<b>Figure III.15:</b> L'erreur de poursuite <b>phi</b>	78
<b>Figure III.16:</b> L'erreur de poursuite <b>psi</b>	79
<b>Figure III.17:</b> L'erreur de poursuite <b>teta</b>	79
<b>Figure III.18:</b> la trajectoire planifiée avec PSO	82
<b>Figure III.19:</b> la trajectoire planifiée avec FPA	83
<b>Figure III.20:</b> la trajectoire planifiée avec IWO	84
<b>Figure III.21:</b> L'évolution de PSO	84
<b>Figure III.22:</b> L'évolution d'FPA	85
<b>Figure III.23:</b> L'évolution d' IWO	85
<b>Figure III.24:</b> La poursuite de la trajectoire planifiée	87
<b>Figure III.25:</b> La réponse en position <b>x</b>	87
<b>Figure III.26:</b> La réponse en position <b>Y</b>	88
<b>Figure III.27:</b> La réponse en position <b>Z</b>	88
<b>Figure III.28:</b> La réponse en altitude <b>phi</b>	89
<b>Figure III.29:</b> La réponse en altitude <b>teta</b>	89
<b>Figure III.30:</b> La réponse en altitude <b>psi</b>	90
<b>Figure III.31:</b> Les signaux de la commande	90
<b>Figure III.32:</b> La poursuite de la trajectoire planifiée	91
<b>Figure III.33:</b> La réponse en position <b>x</b>	91
<b>Figure III.34:</b> La réponse en position <b>Y</b>	92
<b>Figure III.35:</b> La réponse en position <b>Z</b>	92
<b>Figure III.36:</b> La réponse en altitude <b>teta</b>	93
<b>Figure III.37:</b> La réponse en altitude <b>phi</b>	93
<b>Figure III.38:</b> La réponse en altitude <b>psi</b>	94

<b>Figure III.39:</b> Les signaux de la commande	94
<b>Figure III.40:</b> La poursuite de la trajectoire planifiée	95
<b>Figure III.41:</b> La réponse en position <b>x</b>	96
<b>Figure III.42:</b> La réponse en position <b>Y</b>	96
<b>Figure III.43:</b> La réponse en position <b>Z</b>	97
<b>Figure III.44:</b> La réponse en altitude <b>phi</b>	97
<b>Figure III.45:</b> La réponse en altitude teta	98
<b>Figure III.46:</b> La réponse en altitude <b>psi</b>	98
<b>Figure III.47:</b> Les signaux de la commande	99

## Liste D'abréviations

**UAV** : Unmanned Aerial Vehicle (véhicule aériens autonomes)

**DGAC** : Direction Générale de l'Aviation Civile, est une administration française chargée de réglementer et de superviser la sécurité aérienne, le transport aérien et les activités de l'aviation civile

**PID** : proportional Integral Derivative

**DDL** : degré de liberté.

**FPA** : flower pollinisation algorithm

**IWO** : invasive weed optimization

**AG** : algorithme génétique.

**OEP** : optimisation des essaims de particules.

**3D** : trois dimensions

**2D** :deuxième dimension

**PSO** : particle swarm optimization

# Introduction Général

## Contexte

Les drones sont des véhicules capables d'effectuer des tâches en vol sans la présence d'humains et ils sont également connus sous le nom de "véhicules aériens sans pilote, en anglais (Unmanned Aerial Vehicles– UAV).

Ces dispositifs promettent de nouvelles possibilités tant pour des applications civiles que militaires. Ils sont utilisés en particulier pour des tâches difficiles ou dangereuses dans des environnements très hostiles, ceci permet alors d'éviter le risque pour les humains.

Les UAV sont dotés de capacité de perception et de collecte d'information sur leur environnement. Afin de pouvoir accomplir leurs différentes tâches, de localisation, planification et de navigation. Ils doivent se déplacer de façon autonome et être capables d'éviter d'éventuels obstacles.

Les drones, ou véhicules aériens sans pilote, sont des solutions potentielles pour des applications intérieures ou extérieures qui présentent actuellement un danger pour l'homme ou pour la sécurité du matériel, telles que, l'inspection d'ouvrages d'arts comme les ponts ou les lignes à haute tension, l'exploration d'environnements dangereux, etc.

En effet, les drones étaient et restent aujourd'hui la meilleure solution pour éviter la perte de pilotes lors de missions dangereuses. Parmi les drones, le quadrotor se distingue comme étant l'un des systèmes les plus prometteurs de par la diversité des applications, il fait partie de la famille des hélicoptères, plus particulièrement de la famille des appareils multi rotors. Il s'agit d'un appareil qui possède quatre moteurs construits en forme de croix pour lequel il peut être utilisé comme son nom l'indique: les missions de surveillance et d'observation, prises de vue aériennes, la poursuite, l'espionnage, contrôle de l'état d'un édifice difficilement accessible ou même le transport de marchandises.

Avec le développement et la commodité des drones, ces appareils sont de plus en plus utilisés dans un grand nombre de domaines civils, nous nous citons comme exemples : la surveillance du trafic routier, l'exploration environnementale, l'arpentage et la cartographie et la photographie aérienne pour ne pas tous les énumérer.

Les drones sont des systèmes non linéaires à 6 degrés de liberté. Le contrôle de ce type de systèmes nécessite des méthodes sophistiquées. Nous traitons dans ce mémoire la modélisation, la planification de trajectoire et la commande d'un drone.

### **Problématique :**

La modélisation d'un quadrotor n'est pas une tâche aisée, cela s'explique par la complexité et le nombre important d'effets agissant sur le système comme: les effets gyroscopiques, aérodynamiques, la force de gravité, les frottements et les forces d'inertie. Tous ces effets font que notre système est fortement non linéaire, rajoutée à ça une forte interaction entre ses états, et nous obtenons un système difficile à modéliser.

Il existe un autre problème dans le domaine de la robotique aérienne qui est relatives à la planification de trajectoire est : la navigation du véhicule aérien tout en évitant les obstacles, ce problème devient plus complexe avec la présence d'obstacles dynamiques, car différentes variables doivent être prises en considération simultanément : la position de l'obstacle, la vitesse de mouvement de l'obstacle, l'état de l'environnement ...etc.

La problématique principale que nous abordons dans notre étude est planification de trajectoire par des méthodes inspirées de la nature. Nous traitons aussi la poursuite de trajectoire et la commande associée.

### **Solution proposée :**

Nous nous intéressons dans ce travail à la navigation d'un drone dans un environnement complexe contenant des obstacles. Plus précisément, nous abordons la problématique de l'exécution de trajectoires planifiées pour les drones, lors de la présence des obstacles. En nous basant sur l'étude des différentes approches utilisées dans ce contexte, nous élaborons une méthode de planification de trajectoire qui répond non seulement aux besoins fondamentaux de sécurité et d'efficacité, mais aussi à celui d'optimisation qui est basé sur l'intelligence des plantes.

La méthode proposée utilise conjointement deux types d'algorithmes inspirés de la nature : l'algorithme FPA (Flower Pollinisation Algorithme) et l'algorithme IWO (invasive weed optimization).

La commande utilisée pour permettre une poursuite de trajectoire est basée sur le contrôleur PID.

## **L'objectif :**

L'objectif principal de ce mémoire est l'utilisation de l'intelligence des plantes pour le développement d'une méthode de planification de trajectoire pour des drones.

Le premier objectif est de réussir la modélisation complète du robot volant quadrotor, en utilisant le formalisme de Newton-Euler et son implémentation sur Matlab.

Le second objectif est l'implémentation d'algorithmes inspirés du comportement des plantes et de les adapter au problème de planification de trajectoire.

Le troisième objectif est l'utilisation d'algorithmes inspirés des plantes pour la planification de trajectoire du drone avec évitement d'obstacles.

Le quatrième objectif est l'implémentation d'une loi de commande simple qui permet au drone de poursuivre la trajectoire obtenue par les algorithmes inspirés des plantes.

Pour mieux valoriser et valider les résultats obtenus, un cinquième objectif est fixé. En revanche, une étude comparative avec un algorithme de référence (PSO) s'avère indispensable. Nous cherchons à obtenir des résultats compétitifs.

## **L'organisation de ce mémoire**

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre : Portera sur l'intelligence des plantes, qu'on peut utiliser afin de résoudre différents types de problèmes, nous avons choisi deux algorithmes inspirés de la nature et précisément des plantes. Il s'agit de l'algorithme IWO et FPA.

Le deuxième chapitre : nous présentons une étude détaillée sur les drones QUAD et leur modélisation mathématique. Nous commençons par définir le dispositif appelé drone, puis nous décrivons les différentes composantes de son système. Par la suite, nous retraçons brièvement l'historique de ces dispositifs, leur évolution dans le temps, ainsi que les différents critères de leur classification. Nous énumérons enfin quelques domaines d'utilisation des drones. Le modèle dynamique obtenu est utilisé la suite de ce travail.

Le troisième chapitre : est consacré à la planification de trajectoires du drone étudié. Nous détaillons quelques-unes des méthodes les plus utilisées, ensuite nous appliquons les algorithmes FPA et IWO, afin de développer une méthode de planification de trajectoire pour un drone en évitant des obstacles.

Ce mémoire s'achèvera sur une conclusion générale et des perspectives.

# chapitre I

Intelligence des plantes (IP)

## **Chapitre I**

### **Intelligence des plantes**

#### **1. Introduction**

L'être humain fait face, chaque jour, à plusieurs problèmes et cherche à les résoudre et, encore, essaye d'améliorer les méthodes utilisées pour le faire. Ceci peut être interprété comme un processus d'optimisation. Une des plus fréquentes méthodes est l'optimisation mathématique qui concerne la recherche du maximum ou du minimum de fonctions dans une région spécifique et l'obtention de la solution la mieux adaptée à un problème donné.

La plupart des algorithmes d'optimisation ont besoin de modèles mathématiques le système que l'on souhaite optimiser, ou du moins la fonction objective.

Il y a plusieurs méthodes permettant de résoudre les problèmes d'optimisation, parmi elles des méthodes métaheuristiques qui sont des procédures conçues pour résoudre des problèmes d'optimisation dits difficiles, en général sont des problèmes liées à la difficulté de calcul avec des données floues ou approximatives.

Afin de résoudre des problèmes d'optimisation, les scientifiques se sont inspirés des phénomènes naturels où l'intelligence (l'adaptation et l'autonomie) est bien expliquée (ou approximée) par des modèles mathématiques, comme les neurones, la théorie de l'évolution, le raisonnement flou et l'intelligence collective (swarm intelligence).

Dans les dernières décennies, des méthodes inspirées du comportement des plantes ont été proposées. La nature a encore bien d'autres phénomènes qui peuvent être utilisés pour résoudre différents types de problèmes, tels que la stratégie de reproduction des plantes à fleurs par pollinisation. Ceci a inspiré par Yang en 2012, il a proposé un nouvel algorithme appelé l'algorithme de pollinisation des fleurs (FPA)[1]

Une autre méthode connue sous le nom d'optimisation des herbes envahissantes (IWO), inspirée du phénomène de colonisation des herbes envahissantes dans la nature qui a été proposée par Mehrabian et Lucas (2006). Cette technique est basée sur l'écologie et la biologie des herbes envahissantes.

## 2. Optimisation classique et métaheuristique

Les algorithmes d'optimisations classiques sont insuffisants pour résoudre les problèmes qui sont liées au non linéarité de grande échelle aussi aux problèmes combinatoires tels que le nombre de solutions réalisables augmente de la façon exponentiellement en fonction de la taille du problème. Donc ils ne sont pas agissants pour ajustées un problème donnée.

La stratégie de solution des algorithmes d'optimisation classique dépend généralement du type d'objectif et de contraintes (linéaires, non linéaires), dépend du type de variables (entier, réel) utilisées dans la modélisation du problème, dépend fortement de l'espace de solution (convexe, non convexe) et dépend du nombre de variables de décision et du nombre de contraintes dans le problème.

Par conséquent, les algorithmes d'optimisation métaheuristique sont proposés, ils visent à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace.

Ces algorithmes sont devenus des méthodes populaires ces dernières années, en raison de leur bonne puissance de calcul et de leur conversion facile, en d'autres termes, un programme métaheuristique écrit pour un problème spécifique avec une seule fonction objective, peut être facilement adapté à un problème différent.

Les méthodes métaheuristicques à usage général sont évaluées dans neuf groupes différents: les méthodes basées sur la biologie (algorithmes évolutionnaires), la physique (recuit simulé), les méthodes sociales, les méthodes musicales, les méthodes chimiques, les méthodes sportives, les mathématiques, les méthodes basées sur l'essaim (essaims particuliers, colonies de fourmis) et hybrides qui sont des combinaisons de celles-ci.

## 3. Les algorithmes métaheuristicques [1] :

Le mot "métaheuristique" est dérivé de la composition de deux mots grecs :

- Heuristique qui vient du verbe heuriskein (euriskein) et qui signifie trouver.
- Méta qui est un suffixe signifiant au-delà, dans un niveau supérieur.

Les algorithmes métaheuristicques sont des algorithmes généraux d'optimisation applicables à une grande variété de problèmes, ils sont apparus à partir des années 80, dans le but de résoudre au mieux des problèmes d'optimisation difficile. [2]

Il n'existe pas de définition qui fasse l'unanimité, mais tous s'accordent sur les points suivants :[3]

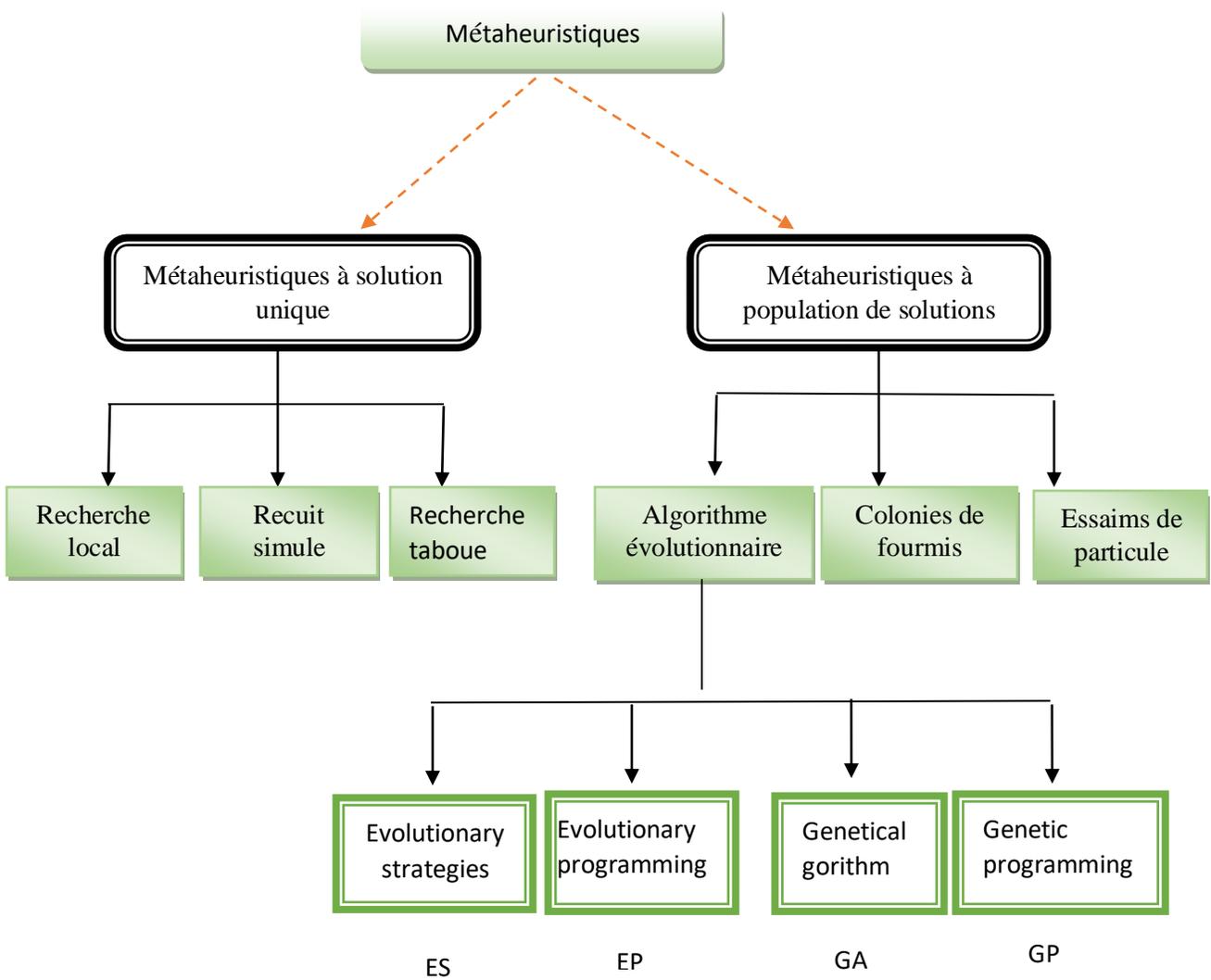
- ✓ Les métaheuristiques sont des stratégies permettant d'éclairer la recherche d'une solution optimale.
- ✓ les métaheuristique explorent l'espace de recherche efficacement pour déterminer des solutions (presque) optimales
- ✓ Les métaheuristiques ne donnent aucune garantie d'optimalité et sont en général non-déterministes.
- ✓ Les métaheuristiques peuvent générer des mécanismes qui permettent d'éviter d'être bloqué dans des régions de l'espace de recherche.
- ✓ Les concepts de base des métaheuristiques peuvent être décrits de manière abstraite, sans faire appel à un problème spécifique.

Ces méthodes sont inspirées de la physique (recuit simulé), de la biologie (algorithme évolutionnaires) ou de l'étude du comportement des diverses espèces animales (essaims particuliers, colonies de fourmis).

Dans ce qui suit, nous présentons brièvement les principales métaheuristiques d'optimisation.

Nous les classons en deux catégories : [4]

- ✓ métaheuristiques à solution unique.
- ✓ métaheuristiques à population de solutions.



**Figure I.1** : les deux catégories de la métaheuristique

Dans le tableau suivant, on cite quelques algorithmes avec leur système d’inspiration :[3,5]

**Tableau I.1**  
Quelques Algorithmes avec leurs inspirations.

Algorithme	Inspiration
Algorithme génétique	Evolution darwinienne dans la nature
Recuit simule	Processus de recuit des matériaux
Optimisation des colonies de fourmis	Comportement des fourmis en quête de nourriture
Algorithme d'abeille	Comportement des abeilles
Optimisation des essaims de particule	Comportement en essaims d'oiseaux
Tabou recherche	Mémoire humaine
Recherche harmonique	Performance musicale
Pollinisation des fleurs	Pollinisation des plantes à fleurs
Recherche de coucou	la manipulation parasitaire de l'espèce de coucou
Algorithme de chauve-souris	Le comportement des microbes

#### 4. Algorithmes d'optimisation inspirés de l'intelligence des plantes [6]

Des études menées ces dernières années indiquent que les plantes présentent également des comportements intelligents.

Au cours des dernières décennies, les chercheurs ont développé de nombreux algorithmes inspirés de la nature afin de tenter de trouver les meilleures solutions pour divers problèmes d'optimisation, par exemple : l'algorithme génétique (AG), l'optimisation des essaims de particules (PSO), les algorithmes de colonies des fourmis, l'algorithme de pollinisation des fleurs (FPA) qui a été développé en 2012 par Yang (2012) et L'optimisation des herbes envahissantes (IWO), inspirée du phénomène de colonisation des herbes envahissantes dans la nature, qui a été proposée par Mehrabian et Lucas (2006).

##### 4.1. Algorithme de Pollinisation des Fleurs (APF)

C'est un algorithme efficace appliqué aux problèmes d'optimisation. C'une technique inspirés de la nature basée sur les essaims qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs en raison de ses caractéristiques impressionnantes. Elle a été proposée par Xin-She Yang [7].

## 4.1.1 Description de processus de pollinisation chez les fleurs

La majorité des plantes sont des plantes à fleurs, il existe plus de 250000 espèces de plantes à fleurs dans la nature où, la pollinisation représente la principale stratégie de reproduction des plantes et comme étant un processus de transfert de pollen d'une fleur à une autre par le vent ou par des pollinisateurs tels que les insectes, les papillons, les abeilles, les oiseaux et les chauves-souris.

Les plantes à fleurs ont évolué pour produire du *nectar* afin d'attirer les pollinisateurs et d'assurer la pollinisation.

Les plantes à fleurs ont deux parties différentes qui sont importantes dans la pollinisation : [8,9]

- ✓ Une partie mâle appelée : *étamines* produisant une poudre collante appelée *pollen*
- ✓ une partie féminine appelée : *le pistil*.

## 4.1.2 Caractéristiques de la pollinisation des fleurs [1,10]

La pollinisation prend deux formes fondamentales : biotique ou abiotique :

- ✚ Pollinisation abiotique : le pollen se transfère avec l'aide du vent ou d'eau.
- ✚ Pollinisation biotique : le pollen se transfère avec des pollinisateurs.

Il y en a deux types de pollinisation :

**Auto-pollinisation et abiotique** : il se fait généralement lorsque le pollen d'une fleur pollinise la même fleur ou les mêmes fleurs de la même plante. Cela se produit lorsqu'une fleur contient à la fois les gamètes mâle et femelle. Elles ne nécessitent pas de pollinisateurs, et on estime qu'environ 10% des plantes adoptent cette forme de pollinisation [10].

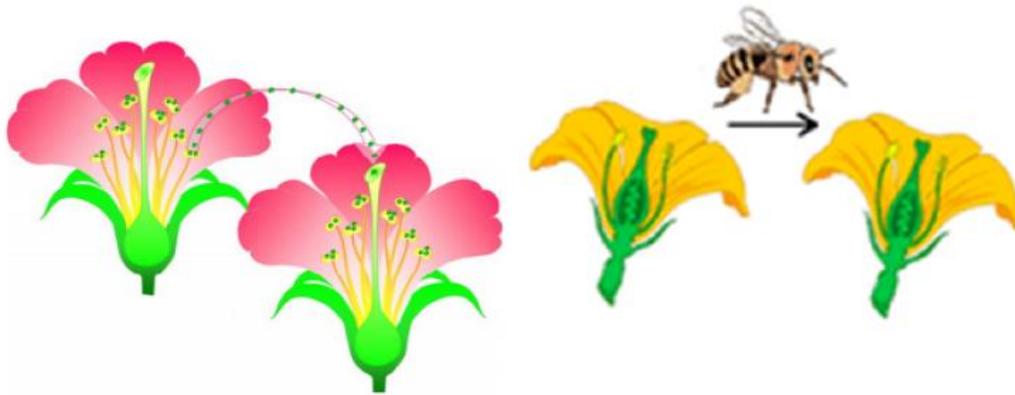


**Figure I.2:** Auto-pollinisation.

**Pollinisation croisée et biotique** :le processus de pollinisation croisée se produit lorsque les grains de *pollen* sont déplacés vers une fleur d’une autre plante à l’aide des pollinisateurs externes [11] tel que : les insectes, des oiseaux, des escargots, des chauves-souris et d’autres animaux c.-à-d., lorsqu’un insecte est assis sur la fleur, les grains de *pollen* collent au corps et une fois il a visité une autre fleur, le pollen sera transféré dans la stigmatisation, ce qui facilite la pollinisation.

Près de 90% des plantes à fleurs utilisent cette forme de pollinisation.

Comme les pollinisateurs se déplacent et volent même à des rythmes et des vitesses variés, le mouvement du pollen peut être assez long.



**Figure I.3:**Pollinisation croisée

Les principales caractéristiques et les composants de l’algorithme d’FPA ont été utilisées pour concevoir un algorithme d’optimisation, appelé algorithme de pollinisation des fleurs (FPA)[1,10], sont citées dans ce tableau suivant :

**Tableau I.2:**

La Pollinisation et ses composants d’optimisation.

Pollinisation des fleurs	Composants d’optimisation (en FPA)
Pollinisateurs (insecte, papillons, oiseaux)	Déplacement /modification des variables
Biotique	Recherche global
Abiotique	Recherche local
Vols de Lévy	Taille de pas (obéissants à une loi de puissance)
Pollen / fleurs	Vecteurs de solution
Constance des fleurs	Similitude dans les vecteurs de solution
Evolution des fleurs	Evolution itérative des solutions
Reproduction optimale des fleurs	Ensemble de solutions optimales

4.1.3 La formulation de l’algorithme FPA

L’FPA est un algorithme inspiré de la nature. Il est basé sur le processus de pollinisation des plantes à fleurs.

Avec la distribution de Levy, l’FPA peut contrôler l’équilibre des propriétés d’exploration et d’exploitation avec une probabilité de changement proposée. Cela conduit l’FPA à atteindre rapidement l’optimum global.

Trois règles d’idéalisation ont été utilisées par Yang en 2012 et peuvent être résumées comme suit : [1,8]

**Règle 1** : La pollinisation globale implique une pollinisation biotique et croisée où les pollinisateurs transportent le pollen sur la base des vols de Levy(distribution de Levy).

**Règle 2** : Pour la pollinisation locale, la pollinisation abiotique et l’autopollinisation sont utilisés.

**Règle 3** :La pollinisation locale et la pollinisation globale sont contrôlées par une probabilité de commutation, en raison de certains facteurs externes, tels que le vent.

Pour illustrer le mécanisme de l’FPA basé sur trois règles, trois étapes clés peuvent être décrites dans les trois sous-sections suivantes

4.1.3.1 Recherche globale d’FPA :

Pendant la pollinisation biotique, les pollinisateurs tels que les oiseaux et les chauves-souris peuvent transférer *le pollen* sur de longues distances assurant ainsi la diversité et la pollinisation les plus adaptées à la reproduction.

la première (Règle1) et la troisième (Règle 3) règle d’FPA peuvent être formulées mathématiquement comme suit :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L.* (x_g - x_i^t) \tag{I.1}$$

$x_i^t$ : Un vecteur de solution à l’itération t, sinon on le considère comme le pollen.

$x_g$  :La meilleure solution trouvée.

L : une taille de pas ou bien une force de pollinisation

En appliquant la distribution de Levy, on peut écrire le paramètre L sous forme d’une équation comme suit :

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad \text{avec } (s \gg s_0 > 0) \tag{I.2}$$

$\Gamma(\lambda)$ : la fonction gamma standard et cette distribution est valide pour les grands pas  $s > 0$ .

Normalement, il est recommandé d’utiliser  $\lambda = 1,5$ . [12]

#### 4.1.3.2. Recherche locale d’FPA

Tant que la pollinisation abiotique se produit sans aucun pollinisateur, la pollinisation locale (Règle 2) et (Règle 3) peuvent être représentées comme suit :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (I.3)$$

Avec  $x_j^t$  et  $x_k^t$  sont des pollens du même type de plante, mais des fleurs différentes.

#### 4.1.3.3. Probabilité de commutation dans FPA

Une fois que nous avons simulé la pollinisation biotique et abiotique en même temps, il faut prendre en considération le pourcentage et la fréquence de chaque type de pollinisation c’est pour ça on utilise une probabilité de commutation (Règle 3), où la valeur de  $p$  détermine si la modification de la solution suit la pollinisation locale ou globale.

A partir de ces trois sous-section on arrive à écrire un pseudo code de l’algorithme de la pollinisation des fleurs FPA.

#### Algorithme1 : Pseudo code d’Algorithme de Pollinisation des fleurs (FPA)

1. définir le problème d’optimisation, sa dimension  $D$  et son espace de recherche min et max
2. Initialiser la population de  $N$  fleurs dans des positions aléatoires
3. initialiser la population initiale  $\mathbf{X}$
4. évaluer la population
5. Chercher la meilleure solution  $\mathbf{x}_g$  dans la population initiale  $\mathbf{X}$
6. définir la probabilité de commutation uniforme  $p$  [0, 1]
7.  $t = 1$ . (Première génération)
8. **while**  $t < \text{Max\_Génération}$  **do**
9.     **for**  $i = 1 : N$  (pour toute fleur dans la population) **do**
10.         **if**  $\text{rand} < p$  **then**
11.             Générer un vecteur de dimension,  $L$  suivant la distribution Lévy
12.             faire une pollinisation globale :  $x_i^{t+1} = x_i^t + L * (x_g - x_i^t)$
13.             **else**
14.                 Générer de la distribution uniforme dans [0,1]
15.             Choisir aléatoirement  $x_j$  et  $x_k$  de la population faire la pollinisation locale  
 $x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon(x_j^t - x_k^t)$
16.             **end**
17.         **end**
18.     **for**  $i = 1 : N$
19.         Évaluer la nouvelle solution générée  $x_i^{t+1}$
20.         **if**  $x_i^{t+1}$  est meilleure que  $x_i^t$  **then**
21.             remplacer  $x_i^t$  par  $x_i^{t+1}$  dans la population
21.         **end**
22.     **end**
23. Mettre à jour la meilleure solution courante  $\mathbf{x}_g$

```

24. t = t + 1
25. end

```

Figure I.4 : Le pseudo-code de l'algorithme FPA

### L'algorithme final de la pollinisation des fleurs sous matlab

```

Clc
clear all
close all
%%
Min=-32%% espace de recherché minimum
Max=32%% espace de recherche maximum
D=30%Number of Decision Variables
N=50%La population de fleurs
max_gen=10000*D/N% maximum génération
fitness=@F1
% initialISATION
x=Min+(Max-Min).*rand(50,D)% x :la population initiale
for i=1:N
    fit_x(i)=fitness(x(i,:))% evaluation
end
% recherche
[Fit_Xg,Pos] = min(fit_x)% la fitness deBest
Xg=x(Pos,)%Best
p=0.7
t=1
fe=1
Evolution=[Fit_Xg]%les fitness dans l'évolution
while t<max_gen
    for i=1:N
        if rand < p
            L=Levy(D);%trace L suivant la distributionLévy
            xt1(i,:)=x(i,:)+L.*(Xg-x(i,:));%pollinisation global
        else
            e=rand(1,D);% distributionuniform
            j=randi(N);%générationaleatoire de j
            k=randi(N);%générationaleatoire de k
            xt1(i,:)=x(i,:)+e.*(x(j,:)-x(k,:));%pollinisationlocal
        end
    end
    for i=1:N
        fit_xt1(i)=fitness(xt1(i,:));%evaluation
        fe=fe+1;
        if fit_xt1(i)<fit_x(i)%anciennefitness supérieure la nouvelle
            x(i,:)=xt1(i,:);% population initial recoit la nouvelle
            fit_x(i)=fit_xt1(i);% fitness ancienrecoit a la nouvelle
            if fit_xt1(i)<Fit_Xg% la fitde best supérieur la nouvellefit
                Xg=xt1(i,:);%bestrecoit la nouvelle population
                Fit_Xg=fit_xt1(i);%la fitde bestrecoitla nouvelle fit
            end
        end
    end
end

```

```

        end
        t=t+1
        Evolution=[ Evolution Fit_Xg];%les fitness de best dans evolution
    end
    Xg
    fit_x
    figure
    loglog (Evolution)
    xlabel ('iteration')
    ylabel ('best')
    grid

```

**Figure I.5:** L'algorithme FPA

#### 4.1.4. Applications et variantes d'FPA :[5]

L'APF est un algorithme récemment utilisé pour :

- 1) Oussama Abdel-Raouf, et. al [13] ont proposé une nouvelle méthode hybride d'optimisation, appelée (algorithme de pollinisation des fleurs avec recherche d'harmonie chaotique) afin d'améliorer la précision de la recherche, utilisé pour résoudre des problèmes de sudoku.
- 2) Oussama Abdel-Raouf et al [14] ont présenté un algorithme hybride de pollinisation de fleurs avec optimisation de particules, afin de résoudre des problèmes d'optimisation sous contrainte.
- 3) Gaganpreet Kaur et.al [15] ont présenté une nouvelle technique pour améliorer la compression d'images par FPA.
- 4) Gaganpreet Kaur, et al [16] utilisent FPA pour segmenter les images en couleurs. L'algorithme a été mis en œuvre pour extraire les grappes optimales des images colorées.
- 5) RuiWang et al [17] ont proposé une amélioration dimension par dimension à l'aide de (APF). Dans cet algorithme modifié, une approche de recherche locale a été utilisée pour améliorer la capacité de recherche locale. Les enquêtes simulées ont montré que l'approche proposée peut améliorer la vitesse de convergence et la qualité des solutions.
- 6) Prathiba R et al [18] ont proposé un (FPA) pour optimiser la répartition de charge économique dans le fonctionnement du système électrique. L'objectif était de minimiser les coûts du carburant.

## 4.2. Algorithm Invasive weed optimization (IWO)

### 4.2.1. Définition

Les mauvaises herbes ont été appelés 'plantes qui poussent dans de mauvais endroit s'ils sont les plantes qui sont en concurrence avec des plantes que nous voulons développer. Ils sont en concurrence pour l'eau, la lumière du soleil et des éléments nutritifs dans le sol.

Certains cas, leurs semences contaminent les cultures de semences et réduisent sa valeur. Certaines mauvaises herbes ont la capacité de modifier la chimie du sol mais de façon subtile avec des effets néfastes sur les espèces de plantes et les animaux qui partagent avec elles le même environnement. [19]

Les plantes invasives sont définies comme étant exotiques, introduites accidentellement ou volontairement par l'homme (20).



**Figure I.6:** Les mauvaises herbes (adventices)

### 4.2.2. Les catégories des herbes envahissantes:

On trouve trois catégories sont :

#### 4.2.2.1 Les plantes annuelles :

Contient deux types, les annuelles d'été et les annuelles d'hiver. [21]

##### 4.2.2.1.1. Les annuelles d'été :

Les plantes annuelles d'été germent au printemps et, produisent des fleurs et des graines et meurent la même année. ils ont une propriété de pousser très rapidement et de produire beaucoup de graines



**Figure I.7 :** Les plantes annuelles d'été

### 4.2.2.1.2. Les annuelles d'hiver

Les plantes annuelles d'hiver germent le début novembre et passent l'hiver à l'état de rosettes, puis quand le printemps arrive, elles poussent très rapidement, fleurissent et produisent des graines ensuite, meurent à la fin de la saison.

### 4.2.2.2 Les bisannuelles

Les mauvaises herbes bisannuelles germent au printemps et passent l'hiver à l'état de rosette puis fleurissent, produisent des graines et meurent la deuxième année. [21]



**Figure I.8 :** Les bisannuelles

### 4.2.2.3 Les vivaces : [21]

Les mauvaises herbes vivaces repoussent année après année et peuvent se reproduire végétativement ou par graines, elles sont difficiles à détruire une fois qu'elles sont établies. On trouve des vivaces simple qui poussent en solitaire et qu'elles peuvent se reproduire par le mode végétatif lorsque les racines sont coupées et dispersées par un travail du sol et des vivaces rampantes poussent en grandes colonies ou en plaques à partir de réseaux de racines et se reproduisent à la fois de façon végétative et à partir de graines.



**Figure I.9:** Les vivaces

### 4.2.3. La formulation de l'algorithme IWO

IWO inspiré du phénomène de la colonisation des herbes envahissantes dans la nature, il est proposé par mehrabian et lucas (2006) et basée sur l'écologie et la biologie des mauvaises herbes envahissantes.

IWO comporte 6 étapes principales :

1. Initialisation
2. Evaluation
3. Reproduction
4. Distribution spatiale
5. La Limitation
6. L'exclusion concurrentielle ou compétitive

**Dans l'étape d'initialisation,** une population initiale aléatoire est dispersée sur l'espace de recherche (dimensions N).

**Dans l'étape d'évaluation,** en suivant la valeur de la fonction de performance, chaque plante, à une position donnée dans l'espace, va croître d'une manière différente par rapport aux autres plantes, la façon de croissance d'une plante reflète une évaluation de sa qualité (solution).

La plante optimale (vecteur solution) est celle qui réduit au minimum la fonction de coût définie par le concepteur.

**Dans l'étape de reproduction,** Selon la valeur de sa propre fonction de coût, une plante peut produire un certain nombre de graines à partir de 0 (*min\_seeds*) à un nombre fixe (*max\_seeds*). La meilleure plante dans la colonie produira un nombre maximum de graines, alors que la plus mauvaise plante ne peut produire aucune graine. Entre ces deux valeurs extrêmes, le nombre de graines produites par une plante quelconque est donné par :

$$S_k = \frac{S_{max} - S_{min}}{f_{min} - f_{max}} (f_k - f_{max}) + S_{min} \quad (I.7)$$

$S_k$  Est la valeur de reproduction (le nombre de nouveaux individus) pour le kème individu, qui a la valeur de coût  $f_k$

$f_{min}$  et  $f_{max}$  sont respectivement le meilleur et le pire coût de la population.

**Dans l'étape Distribution spatiale,** les graines produites seront réparties autour de leur plante parente, sur des distances aléatoires, en utilisant la distribution uniforme avec

une moyenne nulle et un écart-type SD qui diminue itérativement comme le montre l'équation(I.8) :

$$\delta_{itr} = \left( \frac{itr_{max}-itr}{itr_{max}-1} \right)^n (\delta_{ini} - \delta_{inal}) + \delta_{inal} \quad (I.8)$$

$itr_{max}$  est le nombre d'itérations maximales.  $n$  est l'indice de modulation non linéaire  $\sigma_{initial}$  et  $\sigma_{final}$  sont respectivement l'écart-type initial et final.

**Dans l'étape de la Limitation**, les graines vont se développer et devenir de nouvelles plantes qui seront ajoutées à la colonie, jusqu'à ce qu'un nombre maximum de plantes soit atteint.

**Dans l'étape d'exclusion compétitive**, si le nombre de plantes atteint sa taille maximale, une compétition entre ces individus sera lancée pour garder, seulement, les meilleures plantes dans la colonie. Le mécanisme d'élimination fonctionne comme suit :

Après l'atteinte du nombre maximum de plantes dans la colonie, chaque plante à la possibilité de produire un nombre de graines, elles sont évaluées et classées avec leurs parents après avoir trouvé leurs positions dans l'espace de recherche, ensuite on élimine les plantes ayant une fonction de coût inférieure au minimum permis et les meilleures plantes (parents et graines) peuvent survivre, ce mécanisme donne aussi une chance aux plantes, avec une fonction de coût faible, de reproduire dans le cas où leurs graines ont une bonne fonction de coût, dans la colonie[20,22].

Afin de mieux comprendre cet algorithme, il est nécessaire d'utiliser des nouveaux termes qui sont présentés dans le tableau I.3

**Tableau I.3**

Certains des termes clés utilisés dans IWO.

<b>Agent/seed</b>	Chaque individu contenant une valeur de chaque variable d'optimisation dans la colonie
<b>Fitness</b>	Une valeur représentant la qualité de la solution pour chaque graine
<b>Plant</b>	Une graine après évaluation de son aptitude
<b>Colony</b>	Toutes semences ou individus
<b>Size of population</b>	Nombre de plantes dans la colonie
<b>Maximum number of plants</b>	Le nombre maximum de plantes autorisées à produire de nouvelles graines dans la colonie

Le principe général de la méthode des mauvaises herbes, avec ses principales étapes, est détaillé dans l'organigramme de la figure I.10

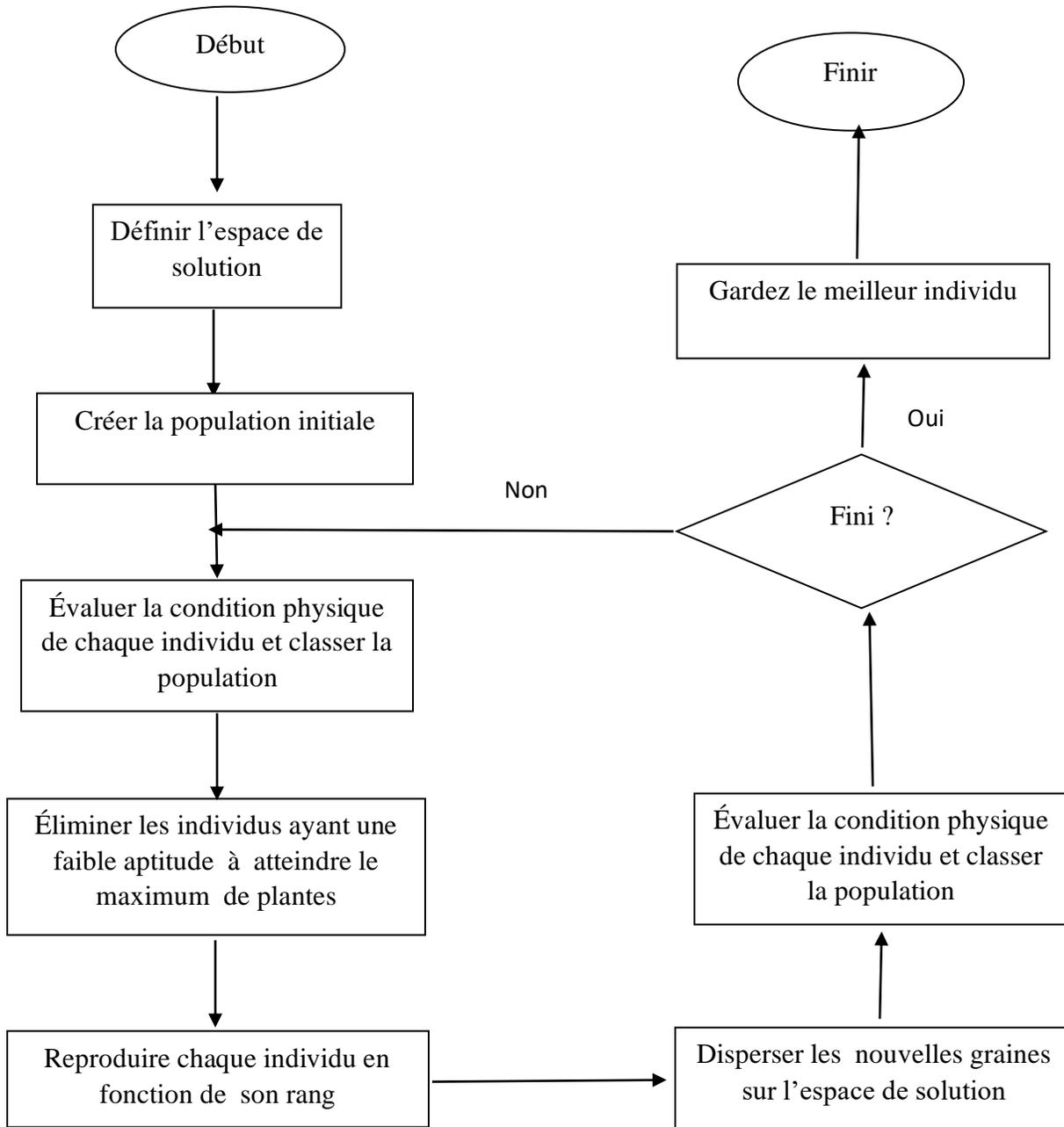


Figure I.10: organigramme d'un algorithme IWO.

## L'algorithme final de (IWO) sous Matlab

```

Clc
clear all
close all
%%iwoparametrees
Ipop=100 % Initial Population Size
Mpop=200 %Maximum Population Size
Smin = 0; % Minimum Number of Seeds
Smax = 5; % Maximum Number of Seeds
Exponent = 2; % Variance Reduction Exponent
sigma_initial = 20; % Initial Value of Standard Deviation
sigma_final = 0.002; %final Value of Standard Deviation
%%Problem Definition
fitness= @(x) F1(x); % Objective Function
VarMin=-100 % Lower Bound of Decision Variables
VarMax = 100; % Upper Bound of Decision Variables
D=30 % Number of Decision Variables D%%%%
max_iteration = D*10000 % Maximum Iteration
%%%%%%%%% initialisation
x=VarMin+(VarMax-VarMin).*rand(Mpop,D)
%%%%%%%%% Evolution
fori=1:Mpop
fit_x(i)=fitness(x(i,:));
end
%%%%%%%%% Update Standard Deviation
fe=1
t=1
%%%%%%%%% Get Best and Worst Cost Values
[Best]=min(fit_x);
[Worst]=max(fit_x);
Evolution=[Best];
sigma=20;
%%%%%%%%%%%%% reproduction
While fe<max_iteration
xt1=[];
fit_xt1=[];
sigma = sigma*0.995;
%sigma =((max_iteration-t)/(max_iteration-1))^Exponent * (sigma_initial -
sigma_final)+sigma_final;
Np=Ipop;
fori=1:Ipop
ratio = (fitness(x(i,:)) - Worst)/(Best - Worst) ;
% 0<ratio<1%
S = floor(Smin + (Smax - Smin)*ratio); % Smin + (Smax -
Smin)*ratio conversion de 0 1 versSmin Smax
for j=1:S
xt=x(i)+sigma*randn(1,D);
fit_xt=fitness(xt);
fe=fe+1;
xt1=[xt1; xt];
fit_xt1=[fit_xt1 fit_xt];
Np=Np+1;
if Np>Mpop
break

```

```

                                end
                                end
                                if Np>Mpop
                                    break
                                end
                                end
                                end
                                X=[x;xt1];
                                FIT=[fit_x fit_xt1];
                                [FIT2,ordre]=sort(FIT);
                                X(:, :)= X(ordre, :);
                                x=X(1:Ipop, :);
                                fit_x=FIT2(1:Ipop);
                                [Best]=min(fit_x);
                                [Worst]=max(fit_x);
                                t=t+1;
                                Evolution=[Evolution Best];
                                end
                                %% Results
                                figure;
                                loglog(Evolution, 'LineWidth', 2);

                                xlabel('Iteration');
                                ylabel('Best');
                                grid on;

```

**Figure I.11:** L'algorithme IWO sous Matlab

#### 4.2.4. Les applications de IWO :

Bien que cette méthode soit récente, les domaines d'application des algorithmes (IWO) sont très nombreux. On peut en citer les suivants :

1. L'optimisation de fonction
2. L'apprentissage des réseaux de neurones tels que MLP (Multi-layer perceptron) [23].
3. La conception des réseaux d'antennes et des dispositifs micro-ondes [22].
4. La configuration des antennes [24].
5. Le marché de l'électricité [25].
6. Le contrôle des robots.
7. Le positionnement optimal des déclencheurs piézoélectriques [26].
8. Le développement des systèmes de commande [27].

### 5. Analyse de performance des algorithmes FPA et IWO

En mathématiques appliquées, les fonctions de test, appelées paysages artificiels, sont utiles pour évaluer les caractéristiques des algorithmes d'optimisation, telles que :

- Taux de convergence.
- Précision.

- Robustesse.
- Performances générales.

On présente trois fonctions de test dans le but de donner une idée sur les différentes situations auxquelles les algorithmes d'optimisation (FPA et IWO) peuvent faire face. Donc cette partie, on va les présenter avec leurs noms, leurs formules mathématiques et leurs graphes ainsi que leur domaine de recherche.

✓ **La fonction de Rosenbrock :**

La fonction de Rosenbrock est une fonction non convexe, introduite par Howard H. Rosenbrock en 1960, qui est utilisée comme problème de test de performance pour les algorithmes d'optimisation[28].

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^{D-1} 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1) \quad (I.9)$$

L'espace de recherche est : [-30,30]

✓ **La fonction de Griewank :**

La fonction de Griewank est une fonction largement utilisée pour tester la convergence des algorithmes d'optimisation. La fonction de Griewank est définie par :

$$f_2(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^D x_i^2 \prod_i^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad (I.10)$$

L'espace de recherche est : [-600,600]

✓ **La fonction de sphère :**

La fonction de sphère est l'une des nombreuses fonctions de test utilisées dans la littérature. Elle est adaptée à l'optimisation à objectif unique, ce qui signifie qu'elle présente une fonction à objectif unique.

elle est définie par :

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2 \quad (I.11)$$

l'espace de recherche est : [-100,100]

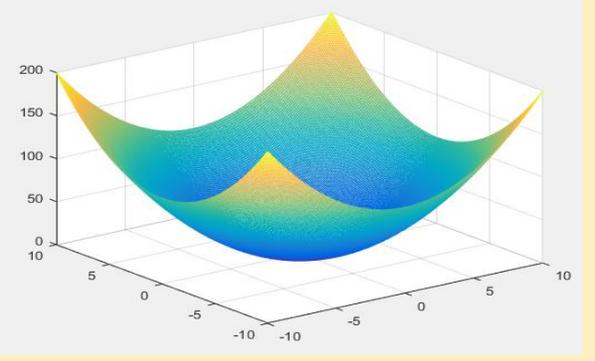
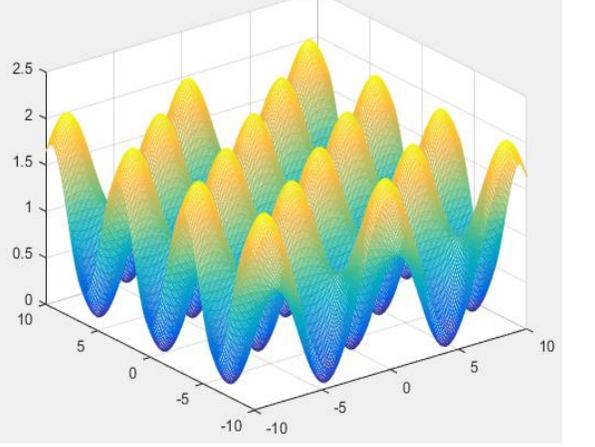
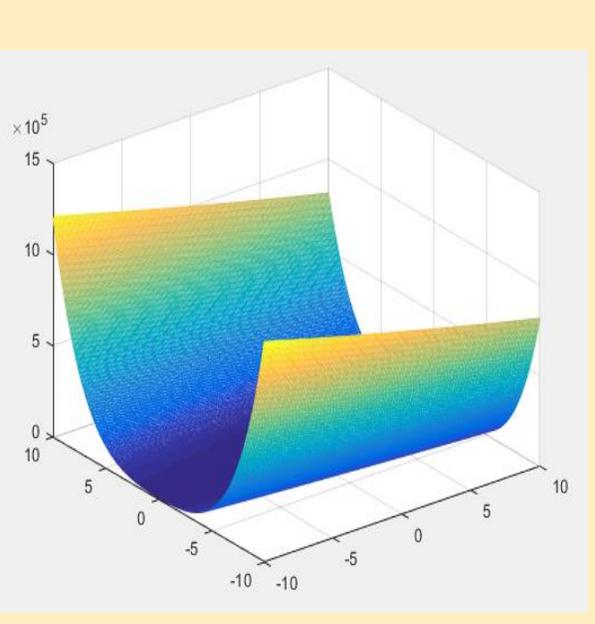
Nom de la fonction	Son formulaire	Son Graphe
sphère	$f_1(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2$	
Griewank	$f_2(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^D x_i^2 + \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	
rosenbrock	$f_3(x) = \sum_{i=1}^{D-1} 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2$	

Figure I.12: les caractéristiques de trois fonctions

Les résultats obtenus par les deux algorithmes (FPA et IWO) en utilisant les fonctions de test sont représentées dans la figure I.13:

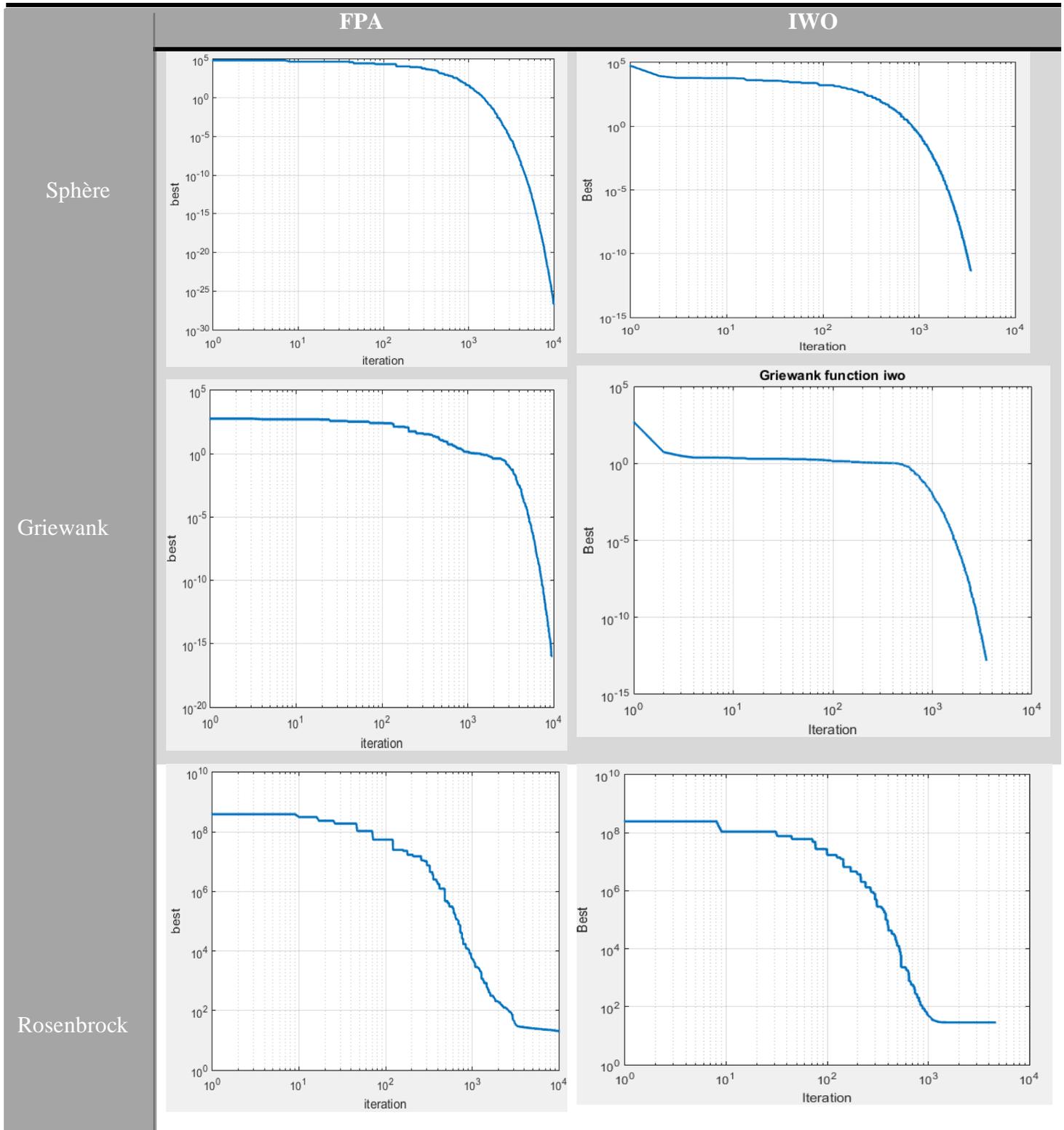


Figure I.13: La simulation de trois fonctions par les deux algorithmes (APF et IWO)

Les paramètres des deux algorithmes (FPA et IWO) ont un rôle spécial sur la robustesse et les performances générales. Après plusieurs tests et la consultation de travaux de référence, nous avons utilisé les paramètres présentés dans le Tableau I.4 et Tableau I.5.

**Tableau I.4**

Les paramètres utilisés par l’algorithme IWO [29]

Symbole	Définition	La valeur
Ipop	La taille initiale de population	30
Mpop	La taille maximale de la population	50
Smin	Le nombre minimal des graines	0
Smax	Le nombre maximal des graines	5
D	Le nombre de variables de décision	30
max_iteration	Le nombre des itérations maximal	D*10000
Sigma	La valeurs de la standard déviation	20

**Tableau I.5**

Les différents paramètres utilisés pour l’algorithme FPA [30]

Symbole	Définition	La valeur
N	La taille initiale de population	30
D	Le nombre de variables de décision	30
Max_gen	Le nombre des itérations maximal	D*10000 [ <b>Critère IEEE</b> ]
P	La probabilité de commutation	0.7

## 5.1. Interprétation les résultats :

- D’après la figure (I.13), on remarque que les deux algorithmes (PSO et IWO) convergent d’une manière lente avec les deux fonctions de test (Sphère et Griewank).
- On remarque que l’algorithme FPA est plus précis par rapport à l’algorithme IWO lors l’exécution sur les fonctions sphère et Griewank.
- On remarque aussi que l’algorithme FPA offre des meilleurs résultats par rapport a l’algorithme IWO.
- Pour la fonction sphère la différence entre les deux meilleures solutions est égale à la valeur ( $10^{-10}$ ), et pour la fonction Griewank, la valeur de différence est égale à

( $10^{-3}$ ) et elle est la même pour la dernière fonction (Rosenbrock), on remarque que les deux solutions sont presque les mêmes.

- Les algorithmes FPA et IWO ne donnent pas une solution exacte au problème Rosenbrock. Ce problème est connu pour être très difficile à résoudre.
- La qualité de convergence des algorithmes FPA et PSO est globalement bonne. Ces algorithmes permettent d'éviter les minimums locaux.

### 6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter deux algorithmes méthanaturels inspirés du comportement des plantes. Il s'agit de FPA et IWO. Nous avons présenté le principe de fonctionnement de chaque algorithme, ensuite, on a réalisé leur implémentation sous Matlab. Enfin, on a utilisé ces deux algorithmes dans le but de les tester avec des fonctions d'optimisation (Benchmark). Une étude comparative entre eux est présentée en se basant sur leurs convergences et les meilleures solutions obtenues. D'après cette analyse, on conclut que FPA donne de meilleurs résultats. Ces deux algorithmes seront utilisés dans la suite de ce travail pour la planification de trajectoire d'un drone. Nous allons procéder dans le deuxième chapitre à la modélisation d'un drone de type quadrotor.

# chapitre II

*modélisation dynamique du drone*

## Chapitre II

## Modélisation dynamique du drone

**1. Introduction**

Les engins avioniques ont profondément pénétré le monde de l'industrie, ils sont capables de transporter des caméras, des capteurs et des équipements de communication ou d'autres dispositifs, principalement pour remplacer l'être humain dans des missions difficiles et dangereuses, ils sont devenus indispensables dans les domaines civils et militaires.

La commande des robots aériens nécessite un modèle dynamique afin de pouvoir tenir en compte les effets gyroscopiques ainsi que les forces aérodynamiques.

Dans notre cas on s'intéresse de près au monde des drones et plus précisément à celui du quadrotor qui est en autre terme un avion à quatre rotors.

Le monde des drones est vaste et regroupe plusieurs disciplines telles que l'électronique, l'informatique, la mécanique, l'aérodynamique [28,29].

**2. Définition d'un drone**

Un drone est un aéronef sans pilote humain à bord qui peut être piloté à distance, de façon autonome ou semi autonome [28], qui peut transporter des charges utiles et être utilisée pour des missions spécifiques telles que la surveillance et la reconnaissance aériennes [30,31].

L'utilisation des drones a d'abord été connue dans les applications militaires, comme une plateforme de désignation de cible où comme arme.



**Figure II.1.** La forme d'un drone.

### 3. L'évolution des drones

En effet, le domaine des drones croît de manière exponentielle depuis le début des années 80, surtout dans le domaine militaire tels que le désormais célèbre *Predator*, par l'armée américaine, qui a été la cause pour laquelle le drone est devenu connu publiquement.

#### 3.1. Prémices des premiers drones

L'histoire des UAV commence en 1883 quand *Douglas Archibald* attacha un anémomètre à un cerf-volant. Il a réussi à mesurer la vitesse du vent à des altitudes de 400 m.

Cinq ans plus tard, *Arthur Batut* équipa un cerf-volant d'un appareil photo et réussit la première photo aérienne le 20 juin 1888 à Paris. Ce furent les premiers engins volants équipés pour la surveillance ou la détection [29,32].



**Figure II.2 :** Vue aérienne de Labruguière en 1889.

#### 3.2. L'entre-deux guerres

Deux véhicules volants sans pilotes furent en développement à la fin de la Première Guerre mondiale :

- ✓ «The flying bomb " de l'US Navy.
- ✓ "Kettering Bug" de Charles Kettering.

Ces véhicules aériens sans pilote fonctionnèrent de façon presque autonome, où après une durée de vol prédéterminée [29].



**Figure II.3 :** OQ-2 parmi des premiers drones en 1941.

### 3.3.La guerre du Vietnam

L'utilisation intensive des drones de reconnaissance commença avec la guerre du Vietnam de 1965 à 1972, les drones surveillaient des zones en Chine, au Nord et à l'Est du Vietnam où il était trop dangereux d'envoyer des appareils avec pilotes.

En 1962, la société Ryan Aeronautical commença à modifier ses drones-cibles BQM-34 en drones de reconnaissance AQM-34 " Lightning bugs ", Ils étaient programmés pour suivre une direction à une altitude donnée pendant un temps donné, puis faire demi-tour et revenir à la base [29,32].



**Figure II.4:** Différents modèles du Ryan 147 (de gauche à droite : 147J, H, G, NX).

3.4. Les années 1990 : [32]

Au cours de la guerre du Golfe, six Pioneer ont participé et permis de récolter des données en temps réel sur la reconnaissance et la surveillance des troupes irakiennes.

Le succès de l'emploi des drones pendant cette guerre poussa la DARPA à lancer plusieurs programmes pour financer le développement d'autres drones : *les drones tactiques* pour les opérations sur la première ligne du front, *les drones de moyenne portée* pour surveiller la zone des opérations, *les drones de longue portée et grande autonomie* pour rechercher des cibles plus lointaines et *des drones discrets* pour observer des zones très bien gardées.

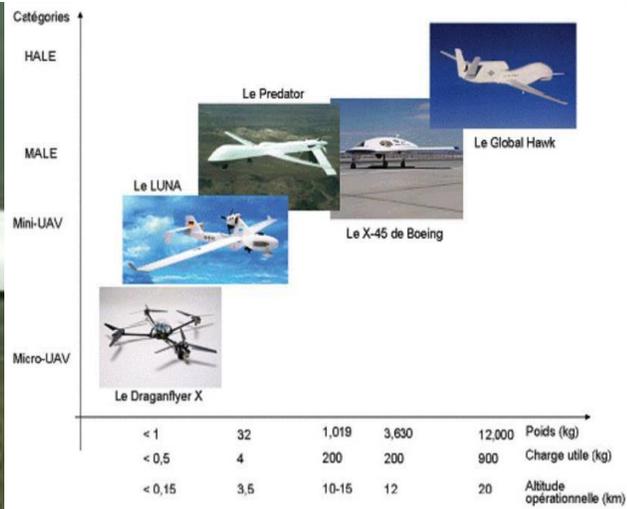


Figure II.5 : RQ-1 Predator Drone

Figure II.6 : Différents modèles de drones

3.5. Aujourd'hui

On trouve plusieurs catégories de drones (militaire et civil) partant de quelques grammes à plusieurs tonnes en différentes formes selon les utilisations et missions pour lesquelles ils sont destinés.



Figure II.7: Les différents types de drones civils et militaires.

#### 4. Classification des drones

La classification des drones varie selon les pays. Cependant, les drones peuvent être répartis en plusieurs catégories selon l'altitude, l'endurance qui est le temps que peut passer l'aéronef en vol, la taille ou encore leur voilure système de contrôle.....etc. Dans ce cadre, les drones peuvent se décomposer en trois familles qui sont : [29,33]

##### 4.1. Les drones à voilure fixe

Les drones de cette famille sont constitués d'une paire d'ailes assurant la sustentation



**Figure II.8:** Drones à voilure fixe.

##### 4.2. Les drones à voilure tournante

Cette famille de drones est caractérisée par le décollage et l'atterrissage vertical, capable de faire du vol stationnaire à basse vitesse et à basse altitude donc n'ont pas besoin de piste de décollage ou d'atterrissage, ils utilisent un ou plusieurs rotors et ils peuvent réaliser des missions irréalisables par les véhicules à voilure fixe.

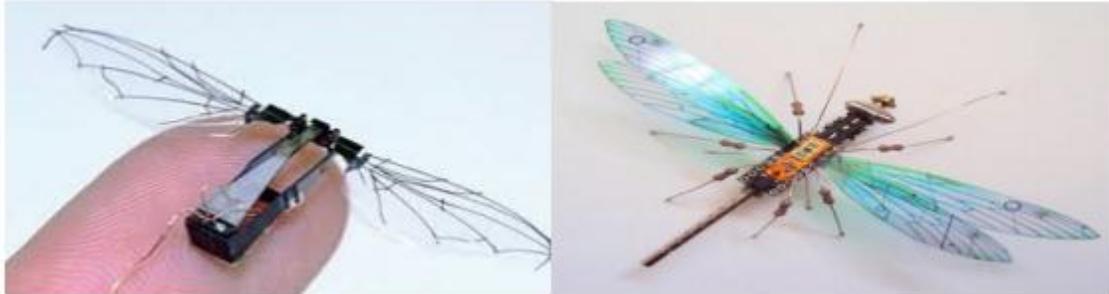


**Figure II.9 :** Drones à voilure tournante.

##### 4.3. Les drones à ailes battantes

La sustentation et le pilotage des drones de cette famille sont assurés par des ailes battantes, menés d'une capacité de vol avec des trajectoires similaires à celles des insectes et de vol stationnaire à basses vitesses comme les voilures tournantes, ce qui est intéressant

pour des missions dans des espaces réduits. Ces engins permettent des manœuvres agiles ce qui représente un autre avantage, certain pour les missions de reconnaissance ou de surveillance.



**Figure II.10:** Drones à ailes battantes.

### 5. Le Quadrotor

Un quadrotor est un robot mobile aérien à quatre rotors défini dans l'espace par 6 DDL [34,35,36]. Ces quatre 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 et 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 [29,37] 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) [34,38]. Le quadrotor a six degrés de libertés, trois mouvements de rotation et trois mouvements de translation, ces six degrés doivent être commandés, en variant la vitesse de chaque rotor changeant ainsi la poussée produite.

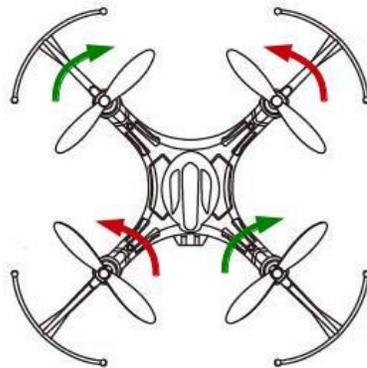
Le quadrotor est un système sous-actionné (le nombre d'entrées de commande est inférieur au nombre de degrés de liberté), ce qui induit une grande difficulté dans la conception de la commande.



**Figure II.11:** le quadrotor

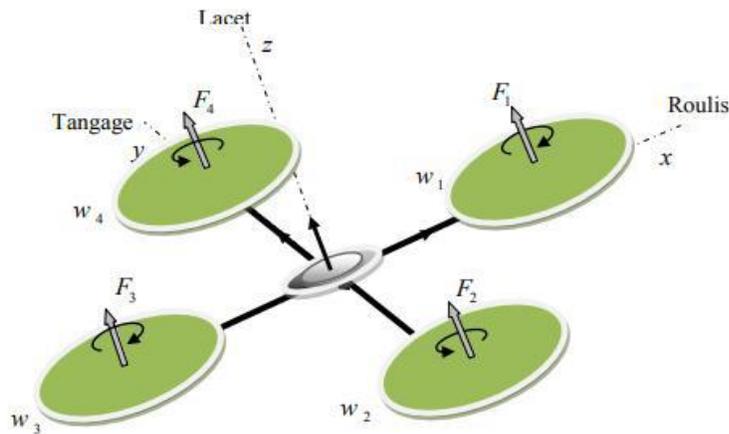
### 5.1. Le Fonctionnement du quadrotor

Son principe de fonctionnement est comme suit : deux rotors de même axe tournent dans le sens horaire tandis que les deux autres tournent dans le sens inverse. Ces mouvements possibles sont le Roulis ou Tangage qui est une orientation que le quadrotor prend, et le lacet qui est une rotation du quadrotor autour de lui-même.



**Figure II.12 :** Sens de rotation des hélices d'un quadrotor

En faisant varier astucieusement la vitesse 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) [38].



**Figure I.13 :** La Structure générale d'un quadrotor. [34]

## 5.2. Le sens de rotation et les mouvements de quadrotor

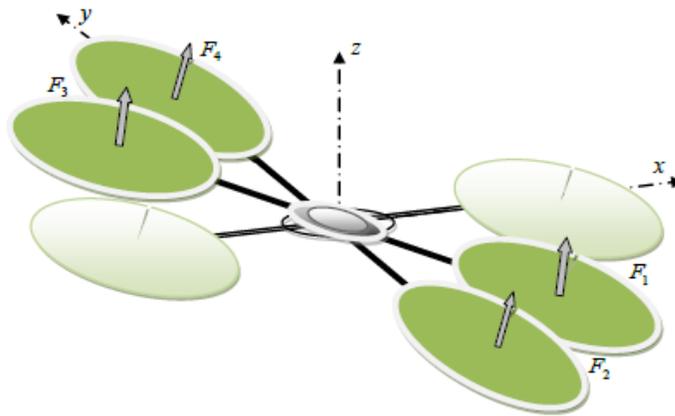
Les mouvements de base du quadrotor sont réalisés en variant la vitesse de chaque rotor changeant ainsi la poussée produite. Ces mouvements sont couplés, ce qui signifie que le quadrotor ne peut pas faire de translation sans réaliser un mouvement de roulis ( $\phi$ ) ou de tangage( $\theta$ ).

Le quadrotor a cinq mouvements principaux :

- ✓ Mouvement vertical.
- ✓ Mouvement de roulis.
- ✓ Mouvement de tangage.
- ✓ Mouvement de lacet.
- ✓ Translations horizontales.

### 5.2.1. Mouvement de roulis

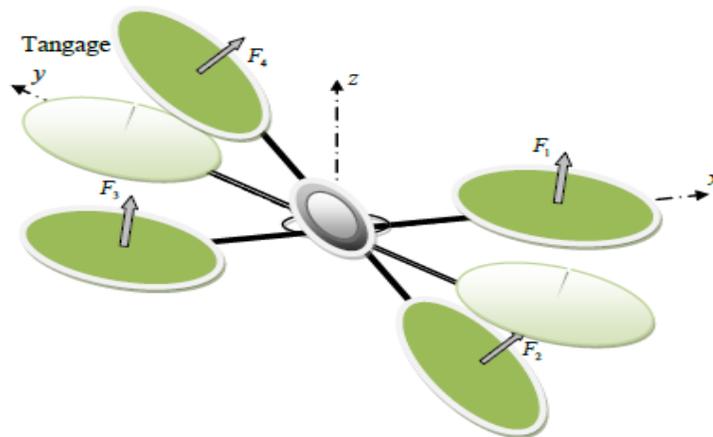
Décrit la rotation selon l'axe X, c'est-à-dire en appliquant une différence de poussée entre le rotor 2 et le rotor 4 et permet à l'appareil d'effectuer un mouvement vers les côtés (à gauche ou à droite).Ce mouvement est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe y.



**Figure II.14 :** Illustration du mouvement de roulis.

### 5.2.2. Mouvement de tangage

Décrit la rotation selon l'axe Y, c'est-à-dire en appliquant une différence de poussée entre le rotor 1 et le rotor 3 et permet à l'appareil de s'incliner vers l'avant ou bien vers l'arrière. Ce mouvement est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe x.



**Figure II.15 :** Illustration du mouvement de tangage.

### 5.2.3. Mouvement de lacet

Autorise un mouvement de rotation selon l'axe Z (axe vertical au sol) et induit une différence de vitesse entre les rotors {1,3} et {2,4}.

Ce mouvement n'est pas un résultat direct de la poussée produit par les propulseurs, mais par les couples réactifs produits par la rotation des rotors. Il est obtenu en augmentant la vitesse des hélices à pas normal et en diminuant proportionnellement la vitesse des hélices à pas inversé.

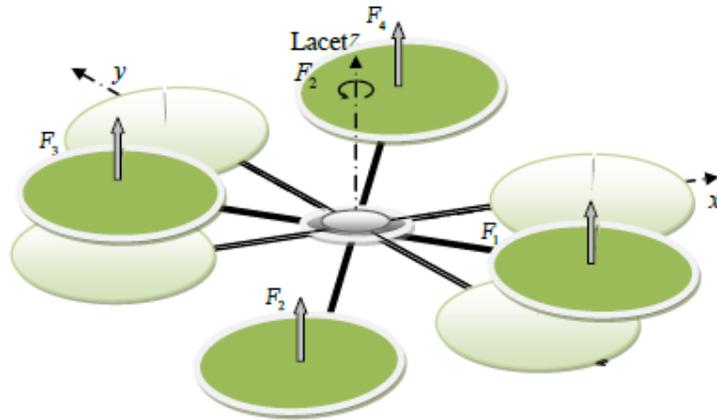


Figure II.16 : Illustration du mouvement de lacet.

**5.2.4. Mouvement vertical**

Le mouvement vertical correspond tout simplement à la montée/descente du quadrotor. La montée est obtenue en augmentant à une 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.

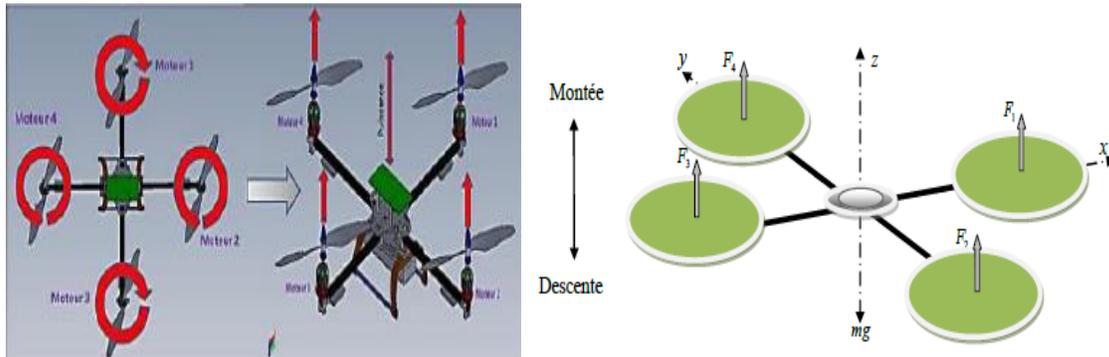


Figure II.17 : Illustration du mouvement vertical

**5.2.5. Mouvement horizontal**

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.

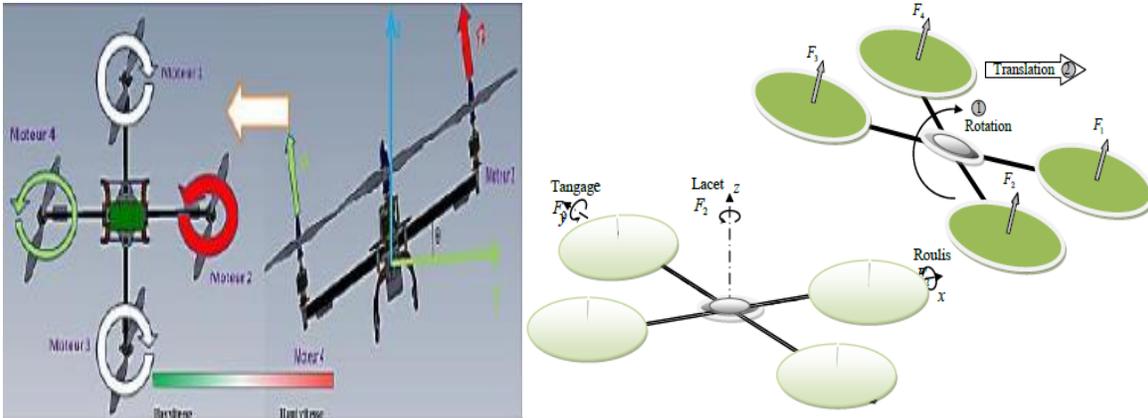


Figure II.18: Illustration du mouvement horizontal

## 6. Modèle dynamique du quadrotor [29,31]

Les quadrotor sont des systèmes mécaniques assez complexes leurs mouvements sont régis par plusieurs effets que ce soit mécaniques ou aérodynamiques.

Le modèle du quadrotor doit prendre en considération tous les effets qui affectent son mouvement entre autres les effets gyroscopiques [28].

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

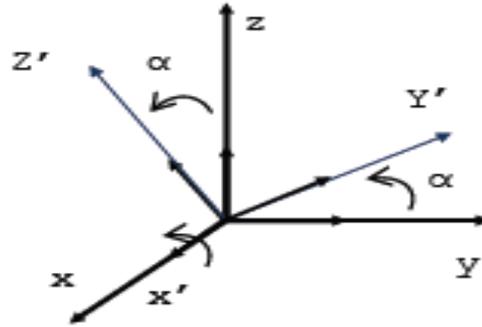
Afin de pouvoir comprendre au mieux le modèle dynamique développé ci-dessous, voilà les différentes hypothèses de travail :

- ✓ La structure du quadrotor est supposée rigide et symétrique, ce qui induit que la matrice d'inertie sera supposée diagonale.
- ✓ Les hélices sont supposées rigides pour pouvoir négliger l'effet de leur déformation lors de la rotation.
- ✓ Le centre de masse et l'origine du repère lié à la structure coïncident.
- ✓ Les forces de portance et de traînée sont proportionnelles aux carrés de la vitesse de rotation des rotors, ce qui est une approximation très proche du comportement aérodynamique.

### 6.1. Orientations et matrices de rotations

- (A) un repère fixe avec les axes  $(X, Y, Z)$  et les vecteurs unitaires associés.
- (B) un repère mobile (rotatif) d'axes  $(X', Y', Z')$  ayant la même origine que (A).

Une rotation sur le repère mobile d'un angle  $\alpha$  autour de l'axe X du repère de référence fixe est décrite comme suit selon la figure ci-contre :



**Figure II.19:** la rotation autour de l'axe X(Roulis), l'axe Y(Tangage) et l'axe Z(Lacet)

Nous avons ainsi ces matrices :

$$R(X, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Les rotations autour des axes Y et Z donnent :

$$R(Y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$R(Z, \psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Matrice de rotation : est le produit de ces 3 rotations qu'on appelle : roll, pitch et yaw (Euler angles) et aussi est une matrice de déterminant égal 1  $\det(R)=1$ .

### 6.2. Angles d'Euler :

le repère mobile est coïncidé avec le repère fixe, après le repère mobile fait un mouvement de rotation autour de l'axe x d'un angle de roulis, suivi d'une rotation autour de l'axe y d'un angle de tangage et suivi d'une rotation autour de l'axe z d'angle de lacet.

- ✓ Roll est une rotation de l'axe x d'un angle  $\phi$  avec :  $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ .
- ✓ Pitch est une rotation de l'axe y d'un angle  $\theta$  avec :  $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ .
- ✓ Yaw est une rotation de l'axe z d'un angle  $\psi$  avec :  $-\pi < \psi < \pi$ .

Alors la matrice de rotation est :

$$R = R(\phi, \theta, \psi) = R(Z, \psi) \times R(Y, \theta) \times R(X, \phi)$$

$$= \begin{bmatrix} C \theta C \psi & S \phi S \theta C \psi - C \phi S \psi & S \phi S \psi + C \phi S \theta C \psi \\ C \theta S \psi & C \phi C \psi + S \phi S \theta S \psi & C \phi S \theta S \psi - S \phi C \psi \\ -S \theta & S \phi C \theta & C \phi C \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Où  $C$  et  $S$  représentent les fonctions trigonométriques  $\cos$ ,  $\sin$  respectivement

### 6.3. Les Vitesses angulaires

Les vitesses de rotation  $\Omega_1, \Omega_2$  et  $\Omega_3$  dans le repère fixe sont exprimées en fonction des vitesses de rotation  $\dot{\phi}$ ,  $\dot{\theta}$  et  $\dot{\psi}$  dans le repère mobile, on a :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R(X, \phi)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + (R(Y, \theta)R(X, \phi))^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

On développe l'équation précédente on trouve :

$$R(X, \phi)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} C \phi \\ -\dot{\theta} S \phi \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$(R(Y, \theta)R(X, \phi))^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) S \phi & \cos(\phi) & \cos(\theta) S \phi \\ -\sin(\theta) \cos(\phi) & -\sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\dot{\psi} S \theta \\ \dot{\psi} S \phi C \theta \\ \dot{\psi} C \phi C \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

On remplace les résultats des équations (II.6) et (II.7) dans l'équation (II.5) on trouve:

$$= \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} C \phi \\ -\dot{\theta} S \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\psi} S \theta \\ \dot{\psi} S \phi C \theta \\ \dot{\psi} C \phi C \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} S \theta \\ \dot{\theta} C \phi + \dot{\psi} S \phi C \theta \\ \dot{\psi} C \phi C \theta - \dot{\theta} S \phi \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Puis, on écrit le résultat en fonction de la vitesse de rotation dans le repère mobile, on trouve :

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -S \theta \\ 0 & C \phi & S \phi C \theta \\ 0 & -S \phi & C \phi C \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

Ensuite, on applique l'inversement c.-à d, on exprime le résultat en fonction de la vitesse de rotation dans le repère fixe on trouve :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S\phi \tan \theta & C\phi \tan \theta \\ 0 & C\phi & -S\phi \\ 0 & \frac{S\phi}{C\theta} & \frac{C\phi}{C\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

En développant l'équation précédente, on aura :

$$\begin{cases} \dot{\phi} = \Omega_1 + S\phi \tan \theta \Omega_2 + C\phi \tan \theta \Omega_3 \\ \dot{\theta} = C\phi \Omega_2 - S\phi \Omega_3 \\ \dot{\psi} = \frac{S\phi}{C\theta} \Omega_2 + \frac{C\phi}{C\theta} \Omega_3 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

## 6.4. Effets physiques agissants sur le quadrotor

**6.4.1. Les force :** les forces agissant sur le système sont :

**6.4.1.1. Le poids du quadrotor:** il est donné par :  $Fg = p = mg$  (II.11)

Avec :

m est la masse totale et g : la gravité.

Elle est toujours perpendiculaire à la surface de la terre

$$Fg = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

**6.4.1.2. Les force 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 :

$$f_i = bw_i^2 \quad (\text{II.13})$$

Avec :

b : est le coefficient de portance et le nombre des pales.

$\omega_i^2$ : La vitesse du rotor i et i = 1:4

**6.4.1.3. La force totale générée par les quatre rotors :** elle est donnée par

$$F_f = R(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_i \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$= \begin{bmatrix} S\phi S\psi + C\phi S\theta C\psi \\ -S\phi C\psi + C\phi S\theta S\psi \\ C\phi C\theta \end{bmatrix} F_i \quad (\text{II.15})$$

**6.4.1.4. La force de traînée :** c'est la conjonction entre une force de pression et une force de frottement visqueux, on a deux forces de traînée qui agissent sur le système :

- ① **La trainée dans les hélices** : elle agit sur les pales et 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 :

$$T^h = d\omega_i^2 \tag{II.16}$$

Avec :

$d$  : est le coefficient de drag, il dépend de la fabrication de l'hélice.

- ② **La trainée selon les axes (x, y, z)** : elle est due au mouvement du corps du quadrotor, elle est donnée par la relation suivante :

$$F_t = K_{ft}v \tag{II.17}$$

Avec :

$K_{ft}$  : Le coefficient de trainée de translation.

$v$ : La vitesse du quadrotor

### 6.4.2. Les moments

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

#### 6.4.2.1. Moment de portance

Générée par les quatre rotors en rotation, elle permet à l'appareil de s'élever si elle compense au moins la trainée.

- ① 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 :

$$\tau_{\phi}^f = \beta l (\omega_4^2 - \omega_2^2) \tag{II.18}$$

Avec

$\beta$  : Le coefficient de portée en (kg.m/rad<sup>2</sup>).

$l$ : est la distance entre l'hélice et le centre de gravité de quadrotor.

- ② 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 :

$$\tau_{\theta}^f = \beta l (\omega_3^2 - \omega_1^2) \tag{II.19}$$

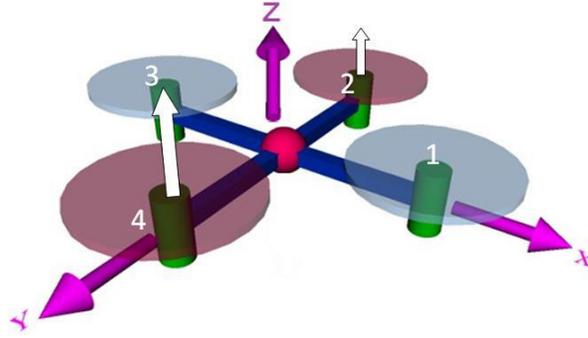


Figure II.20: le moment de portance

6.4.2.2. Moment dû aux forces de traînée :

- ③ 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 :

$$\tau_{\Psi}^f = dl(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \tag{II.20}$$

Avec

d : est une constante reliant la traînée et la vitesse de rotation d'un moteur.

l : est la distance entre l'hélice et le centre de gravité de quadrotor.

A partir des équations (II.18),(II.19) et(II.20), on reformule un moment provoqué par les forces de poussée et de traînée :

$$\tau_f = \begin{bmatrix} \tau_{\phi}^f \\ \tau_{\theta}^f \\ \tau_{\Psi}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta l(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ \beta l(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ dl(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \tag{II.21}$$

- ④ Moment résultant des frottements aérodynamiques, il est donné par :

$$\begin{aligned} \tau_a &= K_{fa} \Omega^2 \\ &= \begin{bmatrix} K_{fax} & 0 & 0 \\ 0 & K_{fay} & 0 \\ 0 & 0 & K_{faz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} K_{fax} \Omega_1^2 \\ K_{fay} \Omega_2^2 \\ K_{faz} \Omega_3^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{II.22}$$

Avec :

$K_{fax}, K_{fay}, K_{faz}$ : Les coefficients des frottements aérodynamiques,  $\Omega_1$  est la vitesse angulaire.

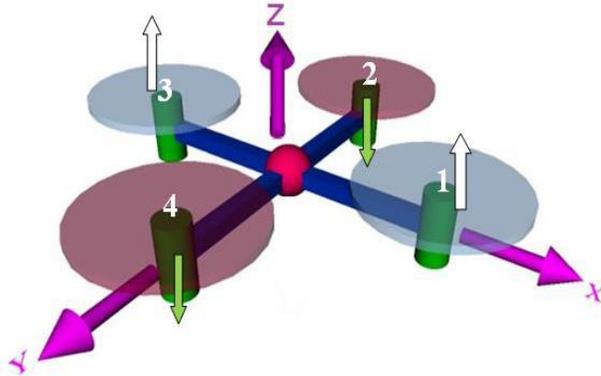


Figure II.21: le moment de trainée

### 6.4.2.3. Moment gyroscopique [39,40,41]

L'effet gyroscopique 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).

L'effet gyroscopique se définit comme la difficulté de modifier la position ou l'orientation du plan de rotation d'une masse tournante.

Dans notre cas il y a deux moments gyroscopiques :

- ✓ le moment gyroscopique dû aux mouvements de quadrotor.
- ✓ le moment gyroscopique des hélices, il est donné par la relation suivante :

$$\tau_g = \sum_{i=1}^4 \Omega \wedge J_r \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (-1)^{i+1} \omega_i \end{bmatrix}$$

Avec  $J_r$  : est l'inertie des rotors.

$$= \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \wedge J_r \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J\bar{\Omega} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{\theta} J_r \bar{\Omega} \\ \dot{\phi} J_r \bar{\Omega} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{II.23}$$

$$\bar{\Omega} = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 \tag{II.24}$$

## 7. Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler

En se basant sur les équations précédentes des forces appliquées au quadrotor les équations II.11- II.17 et les moments agissants sur le quadrotor les équations II.18- II.24.

Pour résumer l'ensemble des équations décrivant le modèle complet du quadrotor, en utilisant la formulation de Newton-Euler et le modèle dynamique du système qui sont présentées sous la forme suivante :[37]

$$\begin{cases} \dot{\xi} = v \\ m\ddot{\xi} = F_f + F_t + F_g \\ \dot{R} = RS(\Omega) \\ J\dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + \tau_f - \tau_a - \tau_g \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$\xi$  :Estle vecteur de position du quadrotor

$m$  : la masse totale du quadrotor

$\dot{\Omega}$ : La vitesse angulaire exprimée dans le repère fixe

$\dot{R}$ : La matrice de rotation

$\wedge$ : Le produit vectoriel

$J$  : matrice d'inertie symétrique de dimension (3x3), elle est donnée par :

$$J = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

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

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

### 7.1.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 utilisant la deuxième loi de Newton dans le cas de mouvement linéaire on a la formule suivante :

$$m\ddot{\xi} = F_f + F_t + F_g \quad (\text{II.28})$$

On remplace chaque force par sa formule, on trouve:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = R(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{ftx} \dot{x} \\ K_{fity} \dot{y} \\ K_{ftz} \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} S \phi S \psi + C \phi S \theta C \psi \\ C \phi S \theta S \psi - S \phi C \psi \\ C \phi C \theta \end{bmatrix} F_i - \begin{bmatrix} K_{ftx} \dot{x} \\ K_{fity} \dot{y} \\ K_{ftz} \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

On commence à faire les opérations dans cette expression puis, on divise le tout sur (m), on trouve les équations dynamiques de mouvement translation comme suit :

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{F_i}{m} (S \phi S \psi + C \phi S \theta C \psi) - \frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = \frac{F_i}{m} (C \phi S \theta S \psi - S \phi C \psi) - \frac{K_{fity}}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{F_i}{m} (C \phi C \theta) - \frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

## 7.2. Dynamique de rotation :

On a:

$$J \dot{\Omega} = -\Omega \wedge J \Omega + \tau_f - \tau_a - \tau_g \quad (\text{II.31})$$

Il suffit juste de remplacer chaque terme par son expression qu'on a trouvée déjà

Donc :

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \\ &= - \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta l (\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ \beta l (\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ dl (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{fax} \dot{\phi}^2 \\ K_{fay} \dot{\theta}^2 \\ K_{faz} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} \\ & \quad - \begin{bmatrix} \dot{\theta} J_r \bar{\Omega} \\ \dot{\phi} J_r \bar{\Omega} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Ensuite on fait l'édition et la simplification on trouve :

$$\begin{bmatrix} I_x \ddot{\phi} \\ I_y \ddot{\theta} \\ I_z \ddot{\psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{\theta} \dot{\phi} (I_z - I_y) \\ \dot{\phi} \dot{\psi} (I_x - I_z) \\ \dot{\phi} \dot{\theta} (I_y - I_x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta l (\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ \beta l (\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ dl (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{fax} \dot{\phi}^2 \\ K_{fay} \dot{\theta}^2 \\ K_{faz} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\theta} J_r \bar{\Omega} \\ -\dot{\phi} J_r \bar{\Omega} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

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

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \left(\frac{I_y - I_z}{I_x}\right) \dot{\theta} \dot{\phi} + \frac{l}{I_x} \beta (\omega_4^2 - \omega_2^2) - \frac{K_{fax}}{I_x} \dot{\phi}^2 - \frac{J_r}{I_x} \bar{\Omega} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{l}{I_y} \beta (\omega_3^2 - \omega_1^2) - \frac{K_{fay}}{I_y} \dot{\theta}^2 + \frac{J_r}{I_y} \bar{\Omega} \dot{\phi} \\ \ddot{\psi} = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{l}{I_z} d (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) - \frac{K_{faz}}{I_z} \dot{\psi}^2 \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

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

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{1}{I_x} \{ \dot{\theta} \dot{\phi} (I_y - I_z) - K_{fax} \dot{\phi}^2 - J_r \bar{\Omega} \dot{\theta} + \beta l U_\phi \} \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{I_y} \{ \dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) - K_{fay} \dot{\theta}^2 - J_r \bar{\Omega} \dot{\phi} + \beta l U_\theta \} \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} \{ \dot{\phi} \dot{\theta} (I_x - I_y) - K_{faz} \dot{\psi}^2 + K_d U_\psi \} \\ \ddot{x} = \frac{1}{m} \{ (C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi) U_z - K_{ftx} \dot{x} \} \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} \{ (C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi) U_z - K_{fity} \dot{y} \} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} \{ (C\phi C\theta) U_z - K_{ftz} \dot{z} \} - g \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$\begin{aligned} U_x &= (C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi) \\ U_y &= (C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi) \end{aligned} \quad (\text{II.35})$$

Et à partir de (II.33,II.34) on trouve :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & \beta & \beta & \beta \\ 0 & -\beta l & 0 & \beta l \\ -\beta l & 0 & \beta l & 0 \\ dl & -dl & dl & -dl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Avec:

$$U_1 = U_z ; \quad U_2 = U_\phi \quad ; U_3 = U_\theta \quad U_4 = U_\psi$$

## 8. Dynamique des rotors [39,40]

Les moteurs utilisés dans le quadrotor sont généralement des moteurs à courant continu avec réducteur qui entraînent des hélices. La dynamique du rotor est approximée à celle d'un moteur à courant continu, elle est donnée par les équations dynamiques suivantes :

$$\begin{cases} v_i = ri + L \frac{di}{dt} + K_e \omega_i \\ K_m i = J_r \frac{d\omega_i}{dt} + C_s + K_r \omega_i^2 \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Tels que :

$v_i$ : est la tension d'entrée du moteur.

$\omega_i$ : est la vitesse angulaire du rotor.

$K_m$ : représentent les constantes des couples électriques.

$K_r$ : est la constante du couple de charge.

$K_e$  : Constante des couples électriques

$r$ : désigne la résistance du moteur.

$J_r$ : désigne l'inertie du rotor.

$C_s$ : représente le frottement sec.

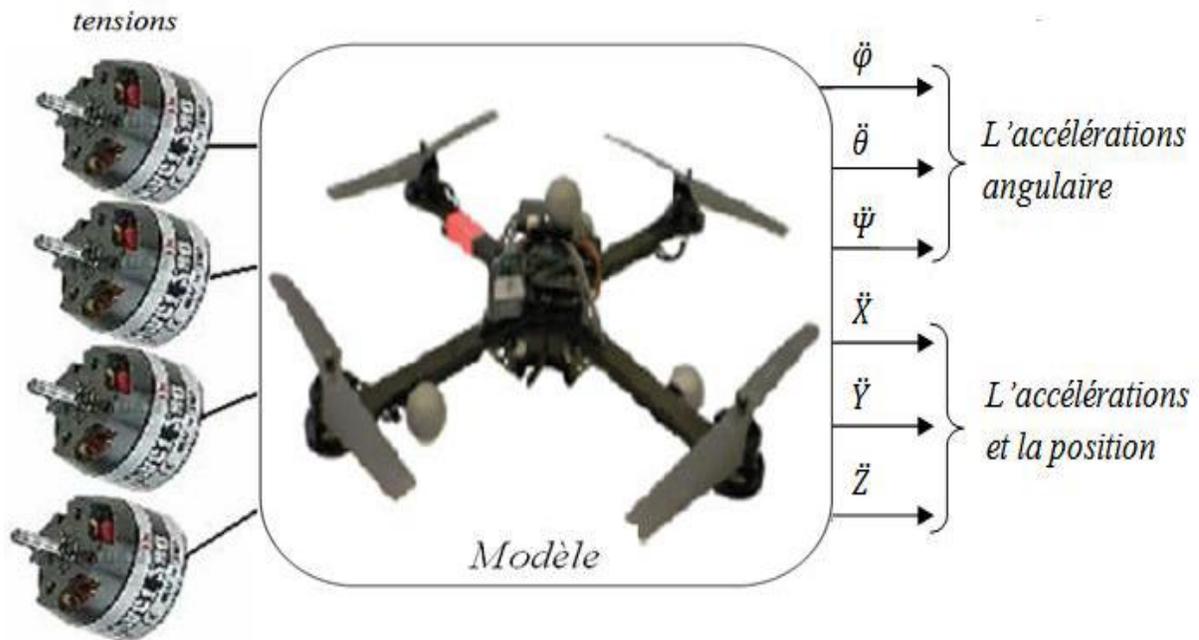
Le résultat de calcul du modèle choisi pour chaque rotor est comme suit :

$$\dot{\omega}_i = bv_i - \beta_0 - \beta_1 \omega_i - \beta_2 \omega_i^2$$

Avec :

$$\beta_0 = \frac{C_s}{J_r} \quad , \quad \beta_1 = \frac{K_e K_m}{r J_r} \quad , \quad \beta_2 = \frac{K_r}{J_r} \quad \text{Et} \quad b = \frac{K_m}{r J_r}$$

Le modèle dynamique du quadrotor peut être vu comme un système où les évolutions spatiales du quadrotor sont les sorties et la tension de chacun de ses moteurs sont les entrées



**Figure II.22:** le modèle dynamique de quadrotor

## 9. La réglementation sur l'utilisation des drones [42]

Des nombreuses réglementations qui sont fixées dans des articles de loi qu'il faut respecter lors de l'usage d'un drone civil qui circule dans l'air telles que : les arrêtes de 11 Avril 2012, les arrêtes de 2016, celles de 2017 et qui se différencient d'un pays à l'autre. On prend à titre d'exemple les règles primordiales mises par la DGAC Française qu'il faut respecter :

1. Assurer la sécurité humaine lors d'utilisation d'un drone.
2. Les hélices du drone sont dangereuses donc, Il est complètement interdit de survoler juste en dessous d'une personne.
3. Il ne faut jamais qu'un drone dépasse une hauteur supérieure à 150 m.
4. Le survole d'un drone la nuit est interdit.
5. la personne qui pilote le drone ne doit jamais perdre de vue son appareil.
6. Il est interdit de survoler un drone en dessus d'un espace public et sur des sites sensibles tels que les zones militaires, les centres nucléaires...etc.

### 10. Conclusion

Dans ce chapitre, premièrement, nous avons présenté des généralités et des concepts de base sur les drones, leurs classifications et leurs évolutions ainsi que leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons élaboré un modèle dynamique complet du Quad en se basant sur l'utilisation du formalisme de Newton-Euler et en prenant en compte tous les différents paramètres qui peuvent affecter la dynamique d'une structure volante tel que les frottements dû aux moments aérodynamiques, les forces de traînées suivant les axes  $(X, Y, Z)$  et les effets gyroscopiques identifiés.

A partir du modèle obtenu, nous concluons que le quadrotor est un système sous-actionné constitué de quatre rotors, deux de ces rotors tournent dans un sens et les deux autres dans le sens inverse. Le modèle obtenu est non linéaire et à 6 degrés de liberté.

En variant les vitesses de rotation de ces rotors, le quadrotor peut faire des mouvements différents aussi bien en translation qu'en rotation, ce qui rend son contrôle relativement difficile. Nous abordons dans le troisième chapitre la planification de trajectoire du drone avec évitement d'obstacle en utilisant l'intelligence des plantes et le contrôleur PID.

# chapitre III

Planification de trajectoire et évitement d'obstacle  
**Planification de trajectoire et évitement d'obstacle**

## Chapitre III

## Planification de trajectoire et évitement d'obstacle

## 1. Introduction :

Les véhicules aériens sans pilote (UAV) attirent de plus en plus l'attention ces dernières années en raison de leur contribution importante et application rentable dans nombreuses tâches. Pour se déplacer en toute sécurité d'une position à une autre, l'UAV doit éviter les obstacles qui se présentent sur son chemin, tout en assurant l'optimalité de sa trajectoire empruntée parmi celles disponibles et qui peut être planifiée à l'avance de la mission et le drone peut alors l'exécuter automatiquement.

La planification de trajectoire d'une manière efficace implique la détermination de solutions permettant d'atteindre un objectif avec précision, comme par exemple éviter les obstacles ou de trouver le plus court chemin en termes de temps de déplacement, ou encore la minimisation du coût de la mission.

Pour comprendre le problème de planification de trajectoires, il est important de bien saisir le sens de certains concepts.

- 1) **Espace environnement**: réfère à l'environnement physique dans lequel se trouve le véhicule, habituellement 2D pour un véhicule sur roues et 3D pour un drone.
- 2) **Configuration**: La configuration d'un véhicule rigide, tel un drone, dans un environnement 3D requiert 6 éléments ( $x, y, z, \textit{lacet}, \textit{tangage}, \textit{roulis}$ ).
- 3) **Espace des configurations**: l'espace de toutes les configurations possibles.
- 4) **État** : similaire à la configuration, mais munis de termes supplémentaires pour représenter le dynamisme du véhicule.
- 5) **Espace des états**: l'espace de tous les états possibles.
- 6) **Espace libre**: l'espace d'environnement, de configurations ou d'états sans obstacle.
- 7) **Espace obstrué**: contraire de l'espace libre.
- 8) **Route**: courbe tracée dans l'espace de configurations.
- 9) **Trajectoire** : courbe en fonction du temps tracée dans l'espace environnement.

Dans ce chapitre, nous allons définir dans un premier temps la notion de la planification et présenter les différents aspects de la planification. Dans un deuxième temps, nous présenterons quelques méthodes qui existent pour planifier une trajectoire, dédiées aux drones et qui sont les plus utilisées, en expliquant brièvement leurs principes, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Puis, on passe à l'étape de la simulation,

là on utilise MATLAB/Simulink et l'architecture de contrôle basée sur la régulation PID pour contrôler des différents mouvements et assurer la poursuite de trajectoire.

## 2. Définition de la planification de trajectoire

### ➤ La planification :

Elle sert à donner les moyens au drone pour trouver une suite d'actions à appliquer sur le monde, pour le faire passer d'un état initial à un état qui satisfait le but à atteindre.

### ➤ L'état :

Représente la position et l'orientation d'un robot à un moment donné.

### ➤ La trajectoire :

C'est une séquence d'actions qui s'exécute à travers le temps et qui mène au but, une fois le plan est déterminé, il peut être exécuté soit dans une simulation soit dans un drone.

La détermination de cette trajectoire se fait en respectant un certain nombre de contraintes et de critères qui sont : [46]

**Contraintes relatives au drone :** Concernant sa géométrie, sa cinématique (des grandeurs dépendant du temps et de l'espace) et sa dynamique (des forces qui s'exercent sur le quadrotor) et même l'architecture (type) du drone.

**Contraintes de l'environnement :** Concernant essentiellement la non-collision avec les obstacles ou d'autre manière la géométrie des obstacles.

### 2.1. Les différents aspects de la planification

La planification présente plusieurs aspects importants [47] :

- ***La prévision***

Dans la cadre de la planification de trajectoire, la trajectoire est une prévision d'une séquence d'actes à accomplir. Lors de l'exécution, la surveillance aérienne permet de vérifier que cette séquence d'actions est bien exécutée et qu'elle mène du point de départ vers le but.

- ***La création d'une nouvelle connaissance***

Dans la planification de trajectoire, une fois cette dernière est élaborée, elle peut être conservée pour la réutiliser lorsqu'un problème similaire se posera.

- ***La résolution automatique du problème***

La solution est l'assemblage d'un ensemble d'actions élémentaires élaboré lors de la planification et qui permet au robot de manière générale d'atteindre l'objectif.

#### 2.2. Types de méthodes de planification de trajectoire [45] :

Il existe différentes manières pour classifier les méthodes de planification, on trouve :

**La méthode globale** : permet de retourner une solution complète en considérant la totalité de l'environnement.

**La méthode locale** : permet de trouver des solutions partielles de fur à mesure que le drone avance dans l'environnement.

**Une méthode online** : si elle est exécutée en plein vol pour guider l'UAV. La classification que nous avons présentée dans cette partie permet de regrouper les méthodes sur trois approches (Geometricmethod, SpaceVelocity et Graph Search).

**Une méthode offline** : si elle permet de trouver le trajet complet du point de départ vers le point d'arrivée avant de décoller.

Ces dernières années, ces méthodes ont été améliorées et appliquées à la planification de trajectoires pour les UAV. Il existe encore d'autres, plus récentes, plus performantes et mieux adaptées pour les drones.

##### 2.2.1. Les méthodes de planification en ligne

Dans cette approche, la recherche du chemin est faite durant le vol de l'UAV en temps réel, où les obstacles peuvent être dynamiques et inattendus. Les solutions retournées sont optimales par rapport à la recherche locale.

##### **2.2.1.1.Méthode de planification de trajectoire géométrique :[48]**

En anglais (A GeometricalPath Planning Method), caractérisée par l'habilité de planifier en temps réel.

##### ***Les avantages :***

- court délai pour retrouver le chemin.
- traitement avec plusieurs formes d'obstacles convexes.
- Pas besoin d'un modèle de grille pour trouver le chemin.

##### ***Les inconvénients :***

- Le chemin global n'est pas garanti en optimalité.

##### **2.2.2. Les méthodes de planification hors ligne**

Dans cette approche, la recherche du chemin se fait avant la mission du vol de l'UAV, où les obstacles sont statiques et détecté dans la carte géographique.

### 2.2.3. Les Méthodes de planification hors ligne et en ligne

Dans cette approche, la planification de trajectoire combine les deux approches précédentes, où l'environnement contient des obstacles statiques et dynamiques et le chemin établi est basé sur la recherche hors ligne et en ligne.

#### 2.2.3.1. Multi-Objective path planning method: [49]

Est une méthode de planification de trajectoire multi objective pour les UAV dans un environnement urbain à basse altitude. Son objectif est de planifier une trajectoire optimale en garantissant la sécurité du drone durant le vol. Pour cela elle traite le problème de la pré-planification statique (hors ligne) qui consiste à trouver la meilleure route en termes de temps abusé et l'évitement d'obstacles statiques, et la replanification dynamique qui est en temps réel (en ligne) qui permet de contourner les obstacles imprévus détectés par des capteurs embarqués.

## 3. La commande PID

### 3.1. Introduction :

Le pilotage d'un engin tel un drone s'avère difficile, d'autant plus que sa structure est très légère, ce qui le rend très sensible aux perturbations extérieures, c'est pour ça on vise à stabiliser le quadrotor.

### 3.2. Modélisation sous Simulink du Quadrotor :

Afin de valider notre modèle dynamique, nous passons à l'étape de la simulation, là on utilise MATLAB/Simulink.

A partir de l'expression des accélérations angulaire, on établit un modèle sous Simulink :

Modélisation de la poussée, de la traînée, de l'effet gyroscopique et de l'effet d'inertie.

Les expressions des accélérations angulaires :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\phi} = \Omega_1 + S\phi \tan\theta \Omega_2 + C\phi \tan\theta \Omega_3 \\ \dot{\theta} = C\phi \Omega_2 - S\phi \Omega_3 \\ \dot{\psi} = \frac{S\phi}{C\theta} \Omega_2 + \frac{C\phi}{C\theta} \Omega_3 \end{array} \right. \quad (\text{voir chapitre II})$$

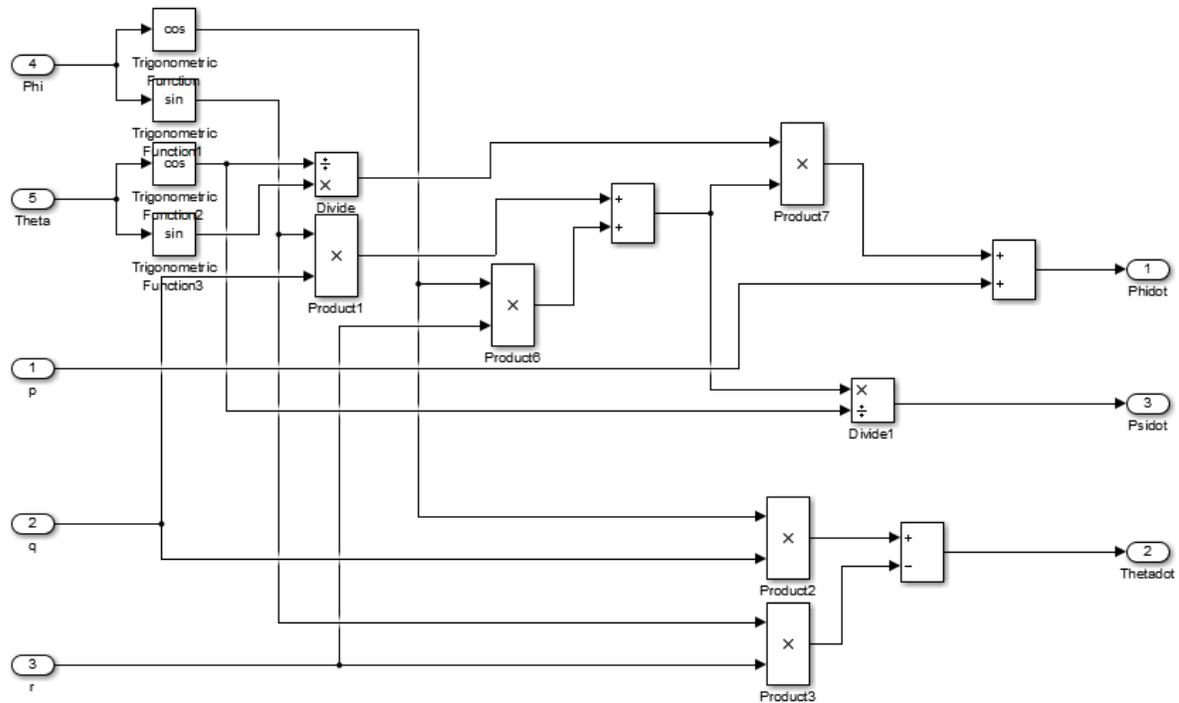
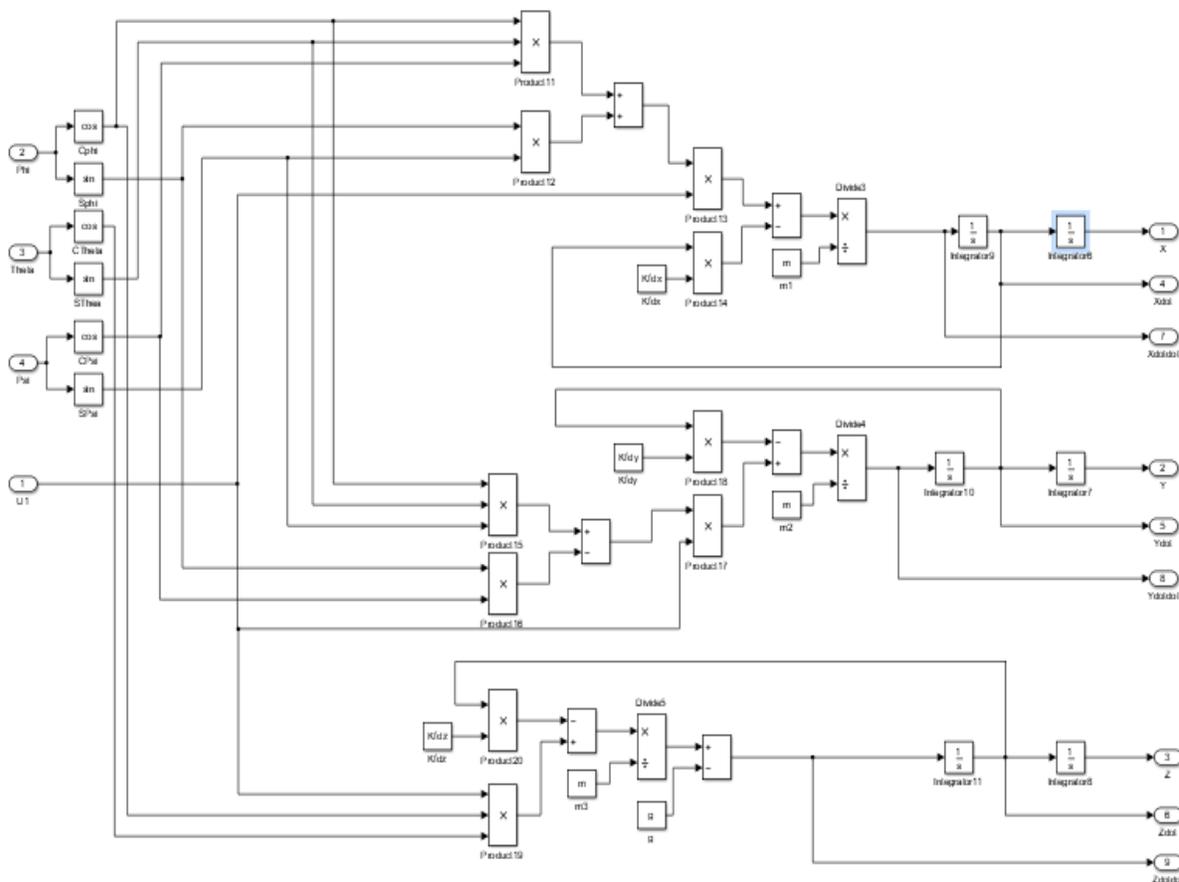


Figure III.1: simulation des accélérations angulaires

Et à partir des équations des accélérations suivant les axes (X, Y) et la position (Z), on établit le modèle sous Simulink qui décrit les équations dynamiques de mouvement translation suivante :

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{F_i}{m} (S \phi S \psi + C \phi S \theta C \psi) - \frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = \frac{F_i}{m} (C \phi S \theta S \psi - S \phi C \psi) - \frac{K_{fty}}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{F_i}{m} (C \phi C \theta) - \frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g \end{cases} \quad (\text{voire chapitre II})$$



**Figure III.2:** simulation de déplacement

Connaissant les relations entre les poussées des différents moteurs et les accélérations angulaires. On peut maintenant réaliser le modèle sur Simulink - Matlab, comme le montre l'annexe A1

### 3.3. La stabilité du 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.

Le contrôleur PID de son acronyme « Proportionnel-Intégral-Dérivé » est l'un des contrôleurs les plus utilisés dans l'industrie dû à la simplicité relative de sa structure. [42] ; à titre d'exemple, il est utilisé pour réguler le comportement de différents systèmes dynamiques tels que le contrôle d'une valve électromagnétique ou d'un niveau liquide dans un réservoir.

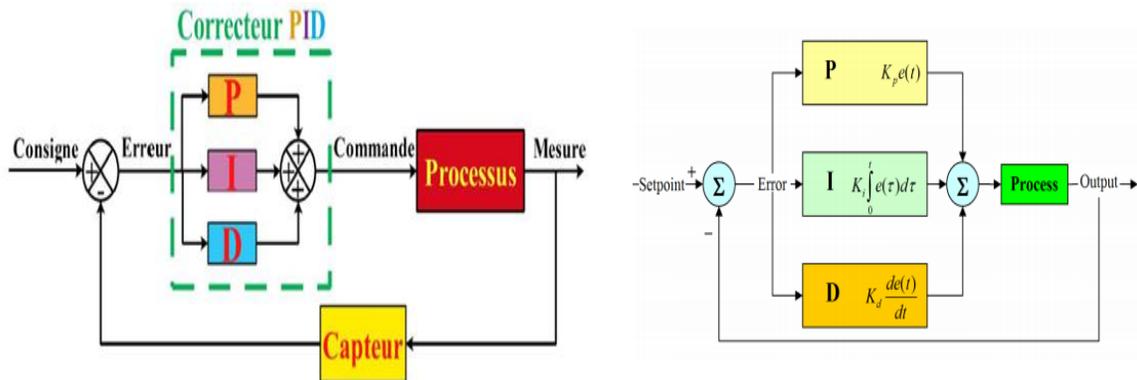
### 3.3.2. Description d'un contrôleur PID : [42,43]

Un régulateur PID ou correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est une structure de calculs dont, le rôle est d'envoyer un signal de commande au système tout en respectant certaines exigences tant au niveau des limitations du système qu'à des caractéristiques spécifiques de sa réponse et c'est un algorithme de contrôle qui permet d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée.

Dans le domaine des drones, ce contrôleur est largement utilisé et sa mise en œuvre est maîtrisée ; ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

Parmi les avantages de ce régulateur, nous citons [50]

- ✓ Structure simple.
- ✓ Bonne performance dans plusieurs processus.
- ✓ Fiable, même sans un modèle spécifique du système de contrôle.



**Figure III.4:** L'architecture parallèle d'un contrôleur PID

Il est basé sur trois opérations : [51]

- ▼ **Coefficients de gain proportionnel** : l'erreur est multipliée par un gain  $K_p$  pour améliorer la rapidité du système, plus  $K_p$  est grand plus le temps de réponse diminue, plus dépassement augmente et stabilité du système est détériorée.
- ▼ **Coefficients de gain intégral** : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps  $t$ , puis multipliée par un gain  $K_i$  pour éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent (erreur statique) et améliorer la précision mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage ce coefficient est plus grand, le système sera plus lent et oscillatoire.
- ▼ **Coefficients de gain dérivé** : l'erreur est dérivée suivant un temps  $t$ , puis multipliée par un gain  $K_d$  ce qui accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle.

Les angles d'orientation sont contrôlés comme décrit dans les équations suivantes:

$$u_{\phi} = k_{pa}(\phi_d - \phi) + k_{ia} \int_0^t (\phi_d - \phi) + k_{da} \frac{d(\phi_d - \phi)}{dt} \quad (III.3)$$

$$u_{\theta} = k_{pa}(\theta_d - \theta) + k_{ia} \int_0^t (\theta_d - \theta) + k_{da} \frac{d(\theta_d - \theta)}{dt} \quad (III.4)$$

$$u_{\psi} = k_{pa}(\psi_d - \psi) + k_{ia} \int_0^t (\psi_d - \psi) + k_{da} \frac{d(\psi_d - \psi)}{dt} \quad (III.5)$$

Où  $Kpa$ ,  $Kia$  et  $Kda$  sont des paramètres du contrôleur PID pour le contrôle des angles de roulis, de tangage et de lacet.

### 3.3.3. L'équation d'un PID : [32]

Les calculs pour délivrer le signal de commande sont basés sur la différence entre sa consigne (position/état souhaité) et sa mesure (position/état actuel du système).

Cette différence est appelée : erreur  $\longleftrightarrow e(t)$ .

Ils existent plusieurs architectures pour combiner les trois actions d'un régulateur PID (série, parallèle ou mixte).

Le modèle du PID utilisé dans ce travail est le suivant :

$$\text{Commande} = k_p e + k_i \int e + k_d \frac{d(e)}{dt} \quad (III.1)$$

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients  $Kp$ ,  $Ki$  et  $Kd$ , afin de répondre au cahier des charges préétabli, assurer les performances en termes de stabilité, rapidité et précision.

La correction se fait à base de l'erreur observée qui est la différence entre la consigne (valeur désirée) et la mesure (valeur réelle).

$$e = \text{consigne-mesure} \quad (III.2)$$

### 3.4. Les gains des contrôleurs PID :

Les gains obtenus par l'algorithme DE [53] sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau III.1 :**

les paramètres de gain pour un PID optimisé.

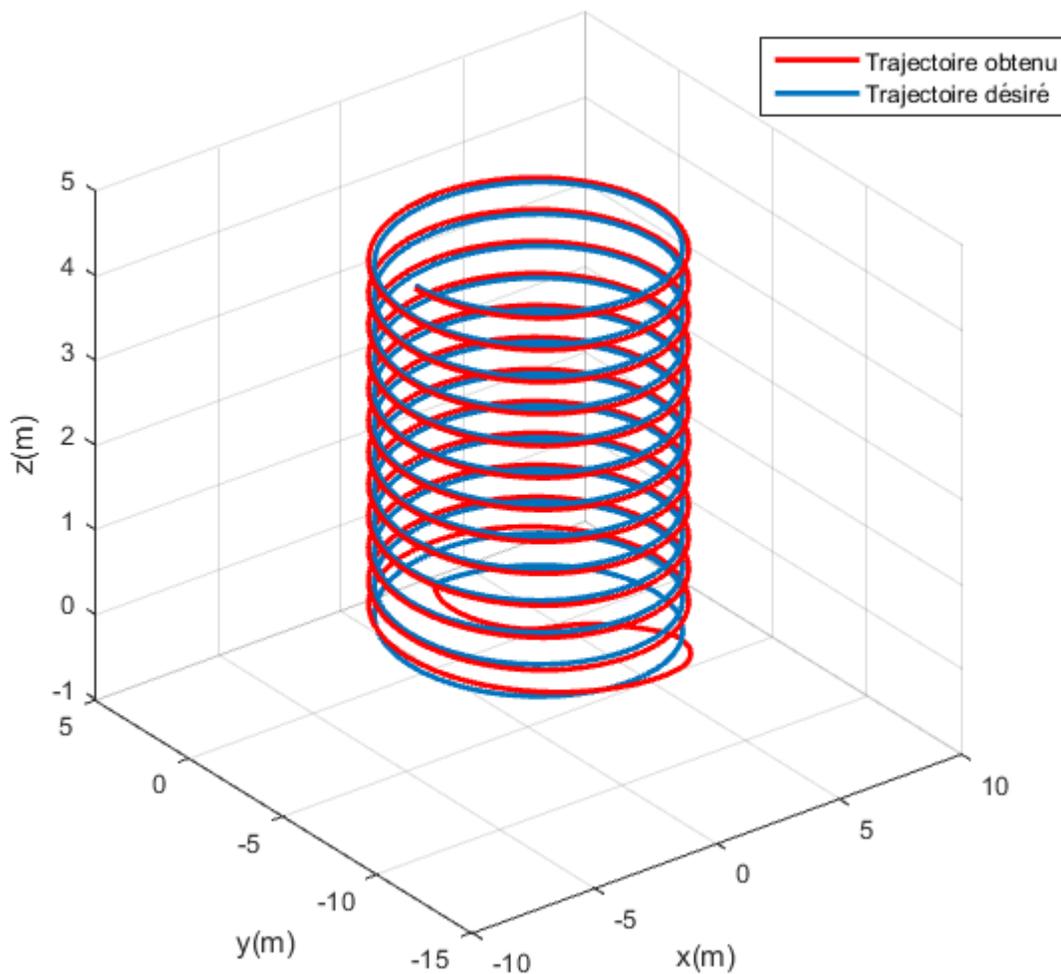
	<b>Kp</b>	<b>Ki</b>	<b>Kd</b>
<b>X</b>	11.5517	0.0058	3.0008
<b>Y</b>	6.6051	0.1	2.4412
<b>Z</b>	12	7.4419	12
<b><math>\phi</math></b>	11.2181	2.2709	0.9105
<b><math>\theta</math></b>	9.3344	0.0752	0.9311
<b><math>\psi</math></b>	0.8661	1.1247	0.1605

## 3.5. Résultats et discussions :

Les résultats obtenus pour une poursuite de la trajectoire sont présentés dans les figures III.5-III.6-III.7- III .8-III.9 -III.10 -III.11.

La figure (III.5 )présente la poursuite de la trajectoire spirale et sa expression mathématique est la suivante :

$$x_d = 5 \sin(t) ; y_d = 5(\cos(t) - 1) ; z_d = \frac{t}{500} ; \psi_d = 0$$



**Figure III.5:** La Trajectoire spirale

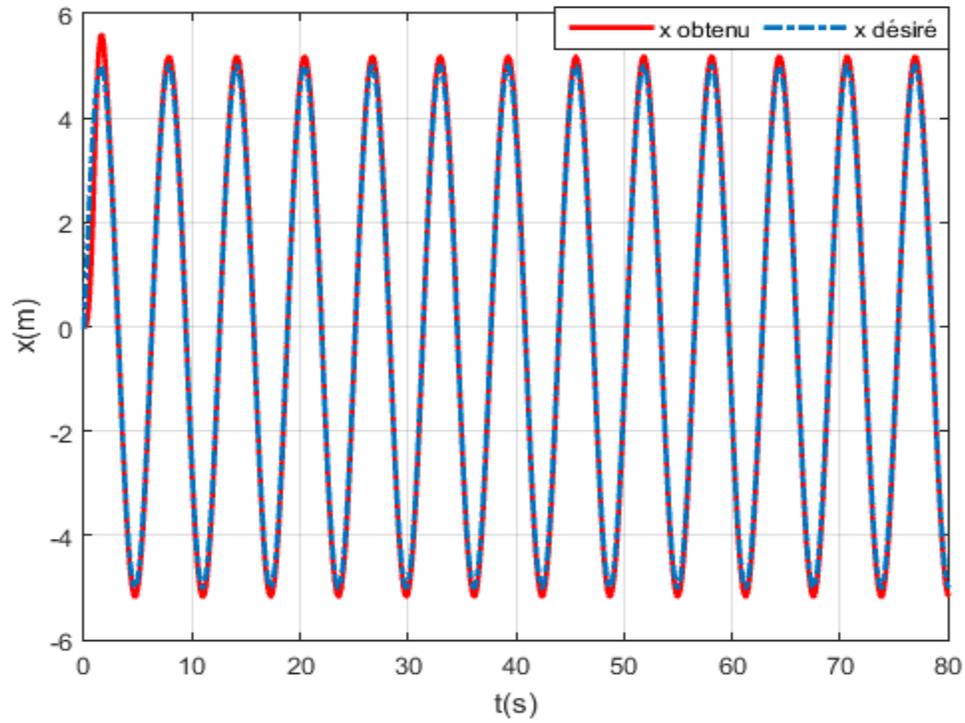


Figure III.6: La réponse en position  $x$

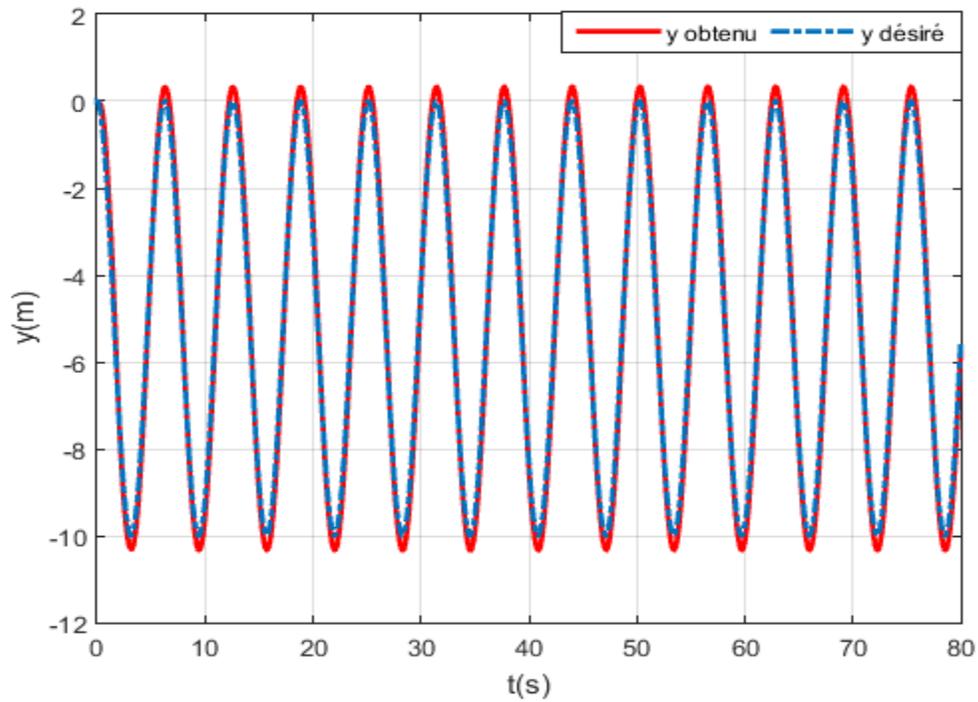


Figure III.7: La réponse en position  $y$

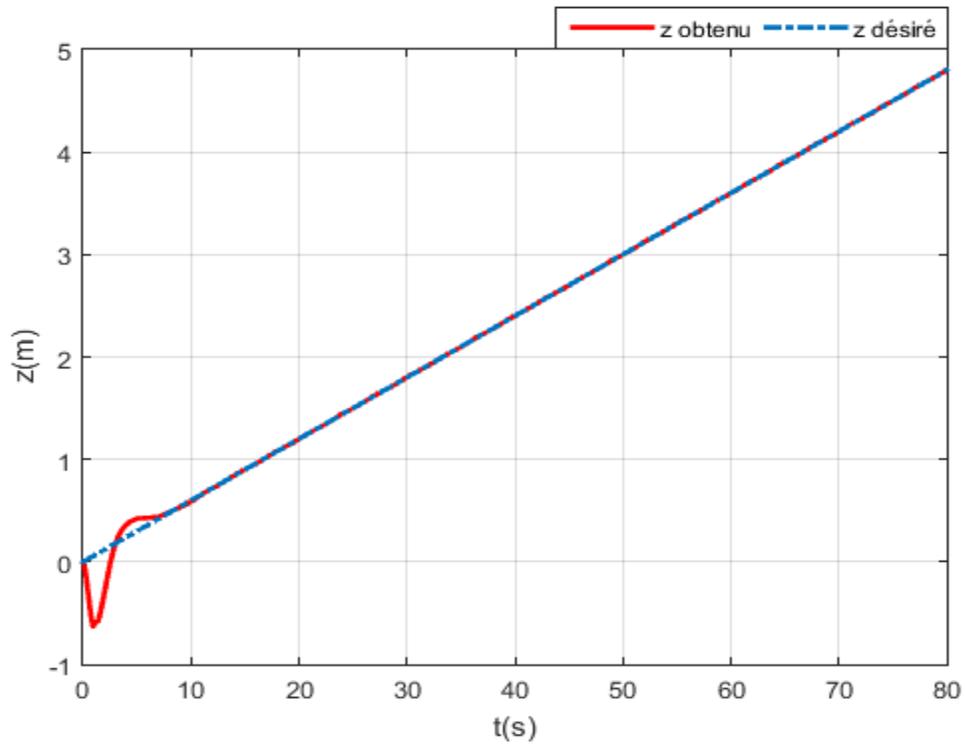


Figure III.8:La réponse en altitude z

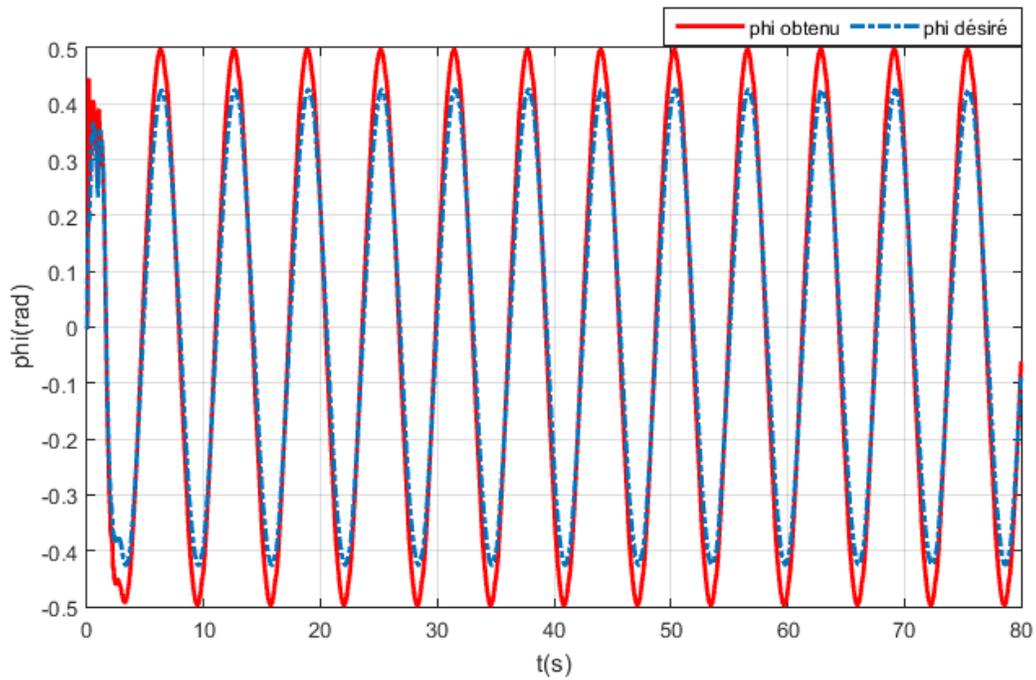


Figure III.9:La réponse en altitude phi

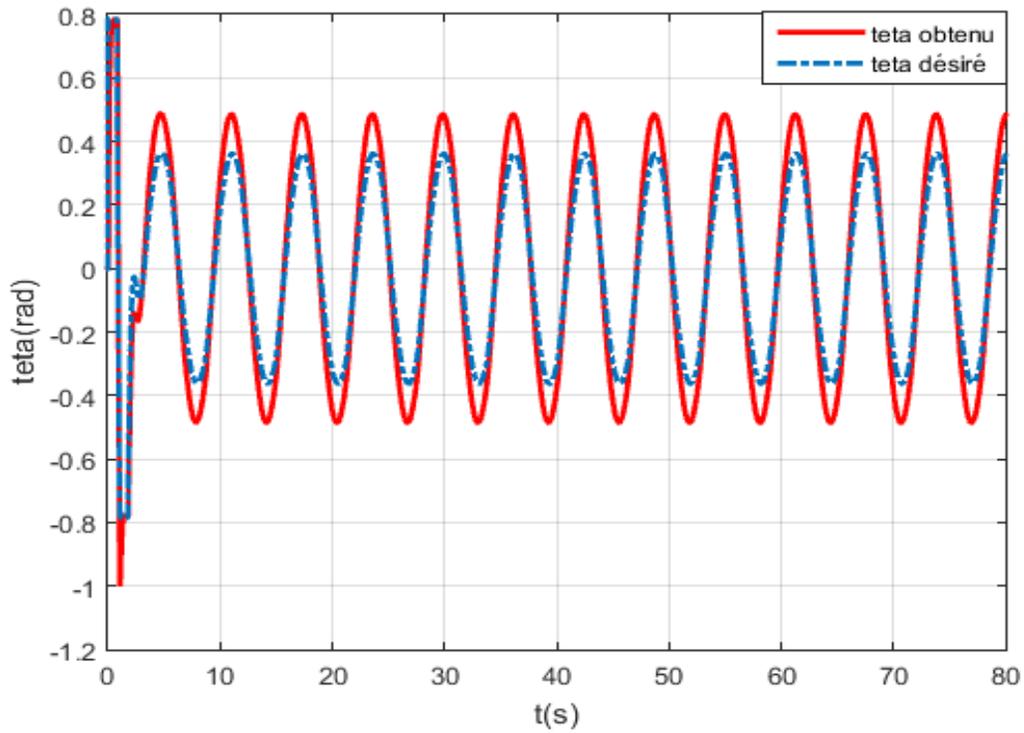


Figure III.10: La réponse en altitude teta

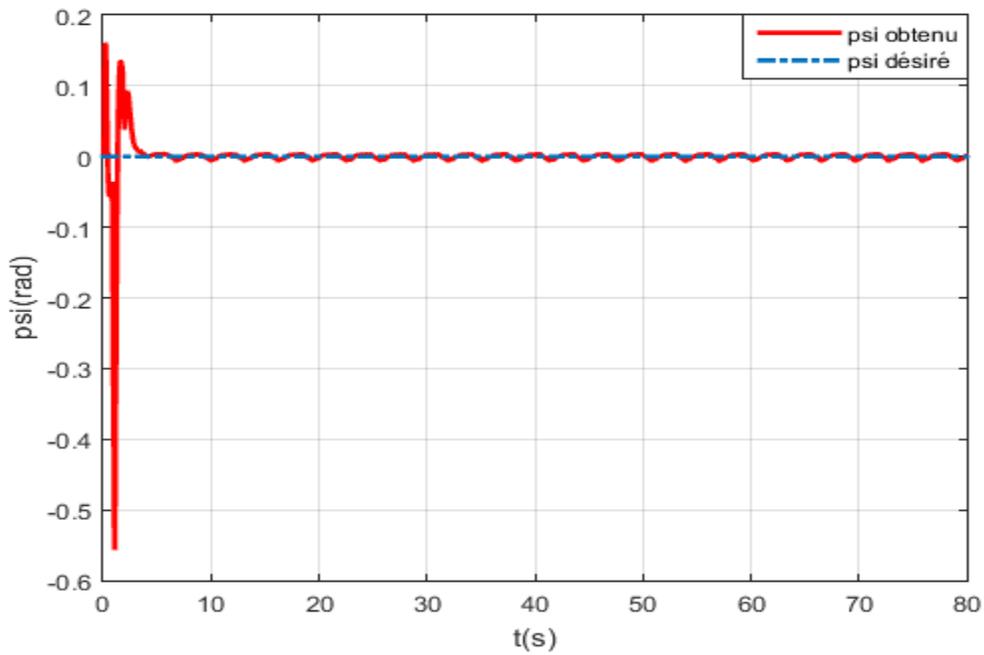


Figure III.11: La réponse en altitude psi

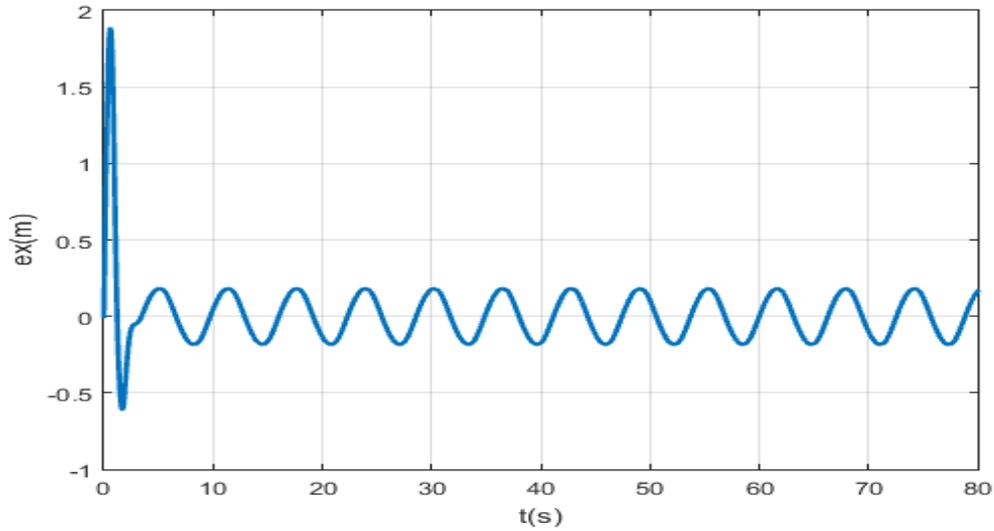


Figure III.12:L'erreur de poursuite pour x

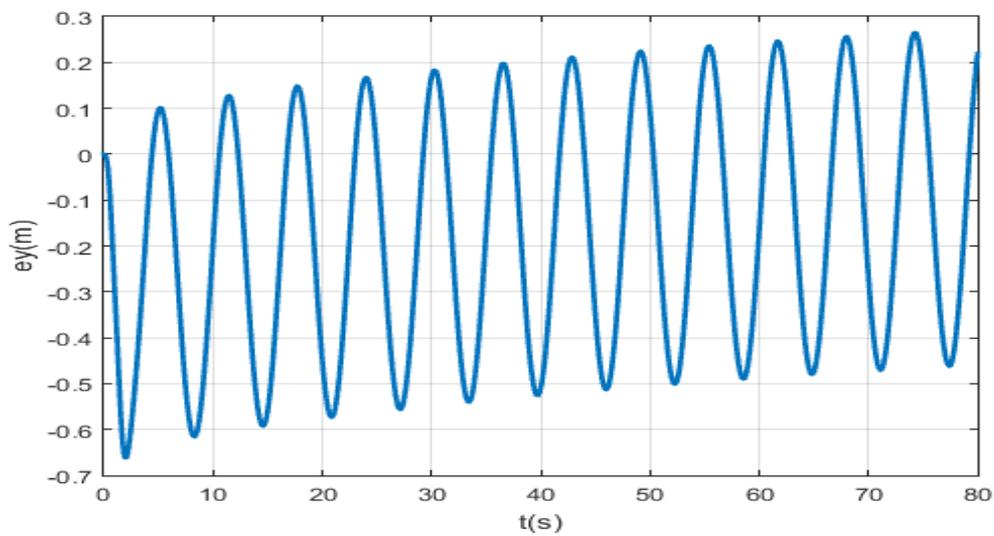


Figure III.13:L'erreur de poursuite pour y

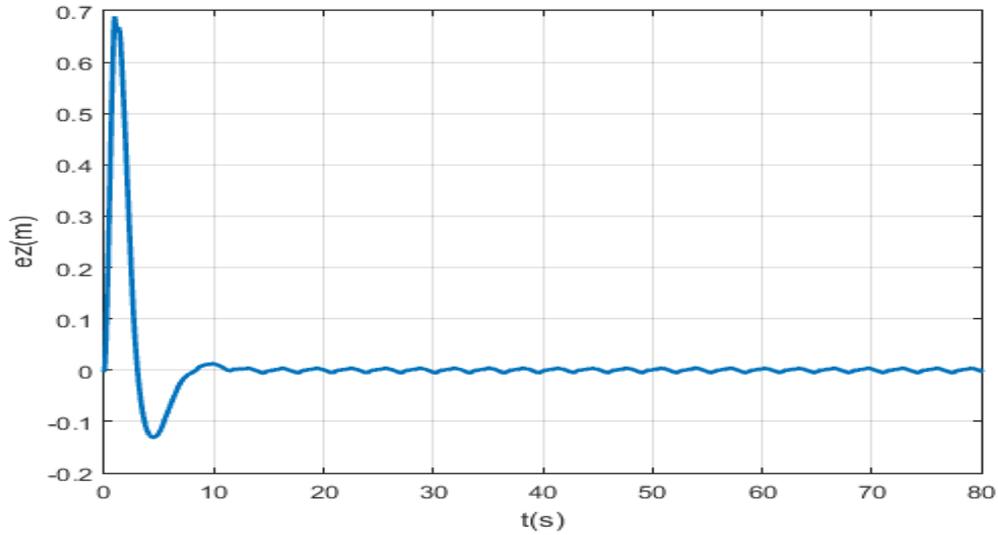


Figure III.14: L'erreur de poursuite pour  $z$

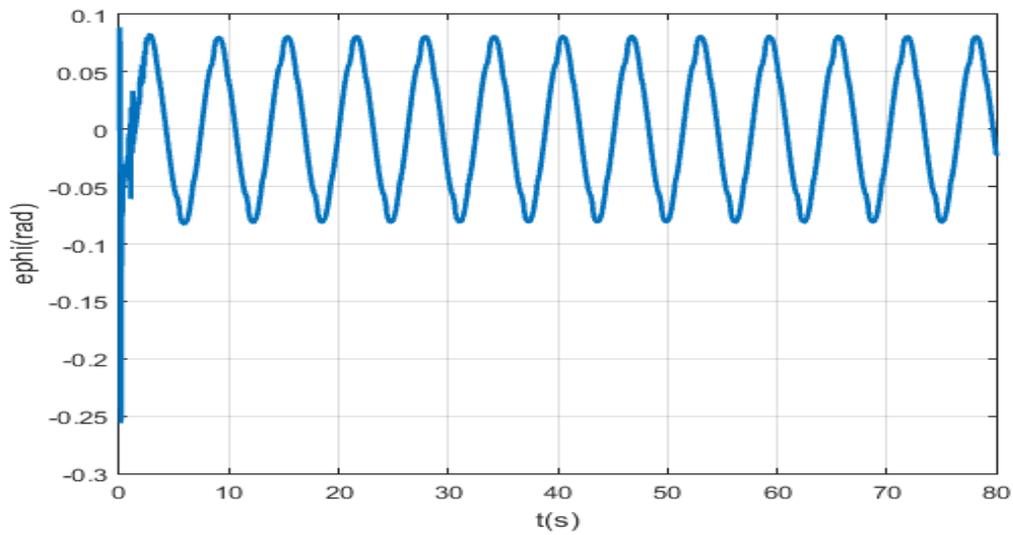
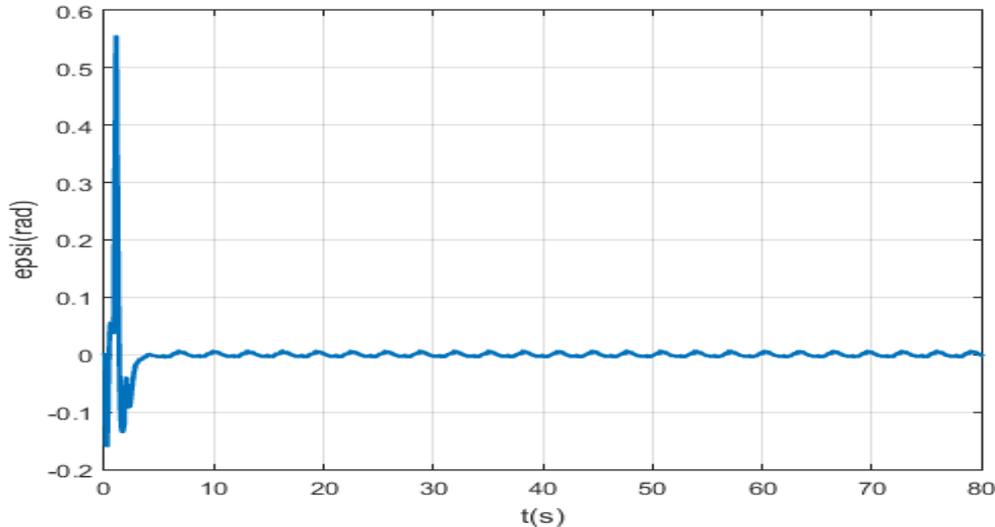
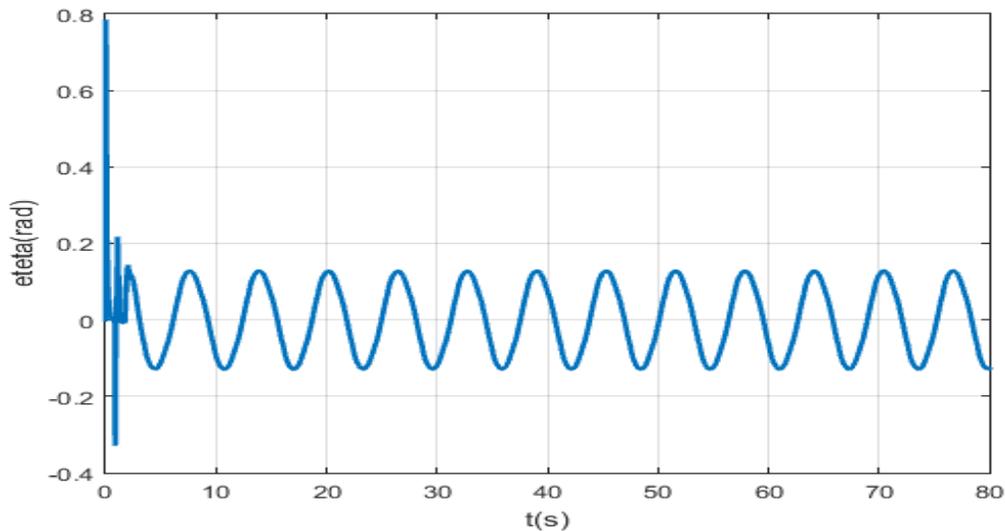


Figure III.15: L'erreur de poursuite pour  $\phi$



**Figure III.16:**L'erreur de poursuite pour  $\psi$



**Figure III.17:**L'erreur de poursuite pour  $\theta$

### 3.6. Interprétation des résultats :

- ✓ La figure (III.5) montre la trajectoire désirée et la trajectoire obtenue par contrôleur PID on peut remarquer que le drone arrive à suivre la trajectoire désirée avec bonne précision.
- ✓ Les figures( III.6- III.8) montrent le résultat obtenu en termes de poursuite des différents mouvements .
- ✓ Les figures (III.9-III.10) présentent le déplacement longitudinal et latéral que le quadrotor peut réaliser avec une rotation des angles de tangage et roulis respectivement.

- ✓ La figure III.11 montre la réponse de lacet avec un dépassement au début de la trajectoire
- ✓ Les figures (III.12-III.17) représentent les erreurs de poursuites et on remarque que l'erreur est minimisée pour toutes les sorties du système.
- ✓ On conclut que le contrôleur PID est suffisant pour réaliser une poursuite de trajectoire.

#### 4. Méthode PSO : [52]

L'optimisation des essaims de particules (PSO) est une métaheuristique inventée en 1995 par deux scientifiques: Russel Eberhart, ingénieur électricien, et James Kennedy, socio-psychologue. C'est un algorithme basé sur la population qui simule le mouvement d'un groupe d'oiseaux. Comme d'autres algorithmes de la famille de la swarm intelligence, PSO suppose que les individus, c'est-à-dire les particules, peuvent faire émerger des comportements complexes auto-organisés en suivant des règles d'interactions très simples (basiques). L'intelligence obtenue est inconnue au niveau de la particule. On parle alors d'intelligence collective.

Les paramètres de l'algorithme PSO sont présentés dans tableau III.3

**Tableau III.2**

Les paramètres de l'algorithme PSO [53]

Paramètre	Description	Valeur
<b>nPop</b>	Nombre d'individus	30
<b>MaxIt</b>	Nombre d'itération maximale	80000
<b>W</b>	Poids d'inertie	1
<b>C1</b>	Coefficient d'apprentissage personnel	1.5
<b>C2</b>	Coefficient d'apprentissage global	1.5

#### 5. Planification de trajectoire :

Les algorithmes présentés précédemment, PSO, IWO et FPA, sont ici utilisés pour trouver un chemin qui permet à un drone de se déplacer d'un point initial à un autre final tout en évitant la collision avec des obstacles et aussi trouver la meilleure trajectoire 3D optimale pour le quadrotor dans un environnement qui comprend 25 obstacles sous forme de cylindres qui sont utilisés pour modéliser des bâtiments de hauteurs et de diamètres différents, et aussi d'optimiser la fonction du coût exprimée en termes de la distance

## Chapitre III Planification de trajectoire et évitement d'obstacle

parcourue par le drone durant son déplacement. L'environnement simulé est inspiré du milieu urbain.

La position initiale du drone est  $(x_s=-100, y_s=-100, z_s=0)$  en passant par trois points intermédiaires et le position de la destination est  $(x_t=100, y_t=100, z_t=0)$ .

La fonction objective est la longueur de trajectoire.

La population, pour PSO, FPA et IWO, contient les coordonnées des points de passage (points intermédiaires). Chaque trajectoire, individu, est définie par cinq points qui sont : trois points intermédiaires, un point de départ et un point d'arrivée.

La fonction spline cubique est utilisée par la suite pour relier les différents points.

La durée du trajet est fixée à 100 secondes.

La taille des obstacles a été augmentée pour considérer le drone comme un point.

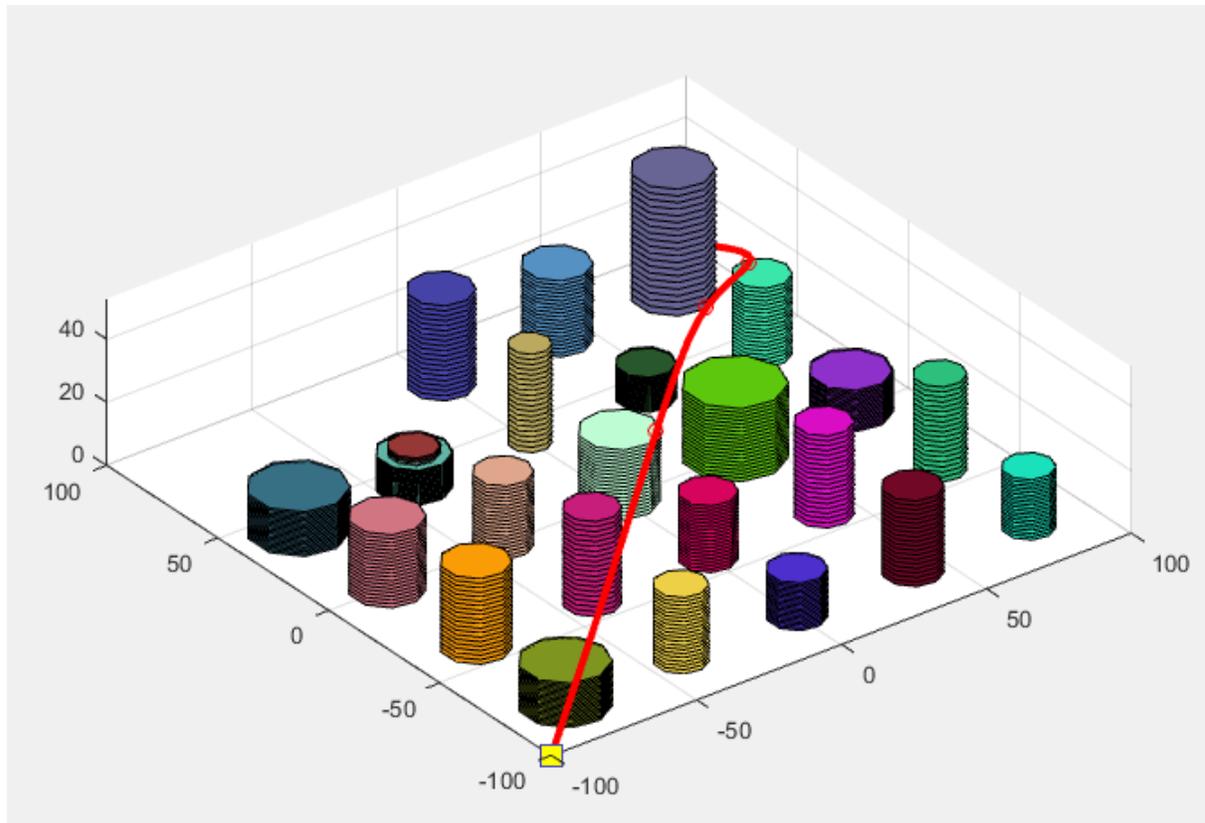
**5.1. Résultats et discussion :** Les résultats obtenus pour la planification d'une trajectoire optimale 3D en utilisant les trois algorithmes précédents (PSO, APF, IWO) sont représentés par les figures( III.18- III.23), après avoir utilisé des ensembles des paramètres qui se différencient d'un algorithme à un autre.

### 1. L'algorithme PSO :

On utilise ces paramètres suivants :

$nPop=30$  ;  $Mpop=60$  ;  $MaxIt=80000$

Nous représentons sur la figure suivante III.18 la trajectoire planifiée avec PSO, après avoir simulé l'algorithme PSO en utilisant les paramètres précédents.



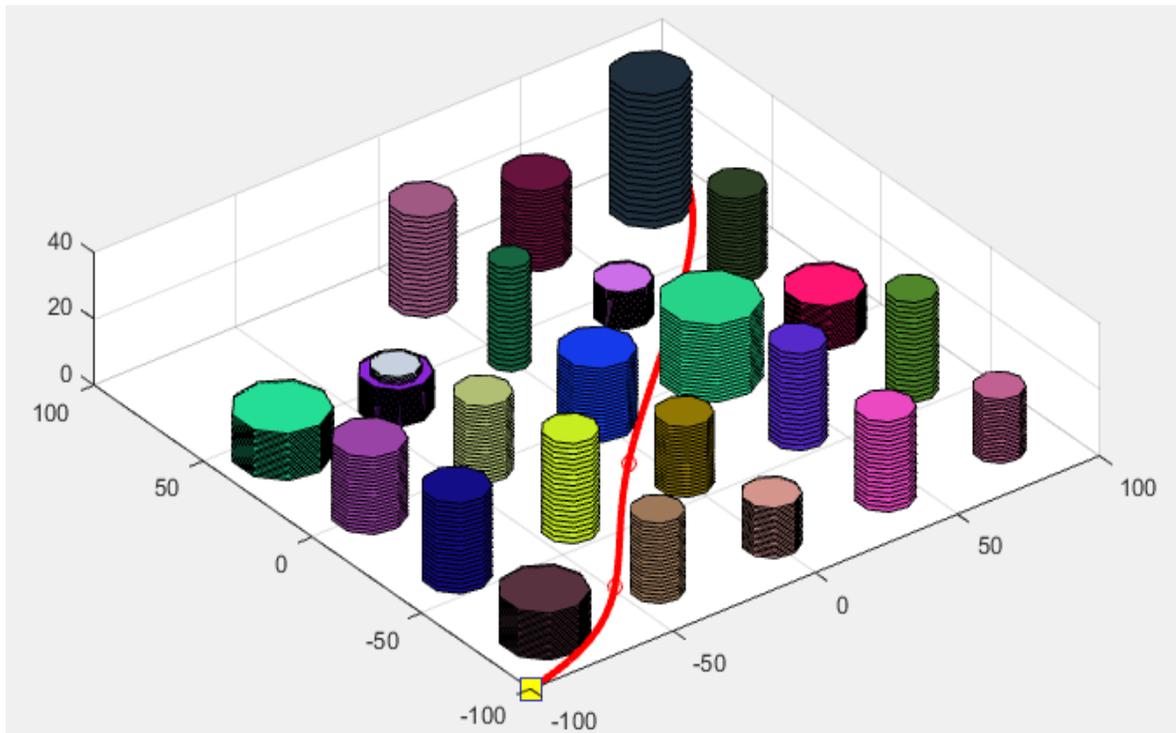
**Figure III.18:** la trajectoire planifiée avec PSO

## 2. L'algorithme FPA :

Les paramètres de FPA utilisés sont :

$$nPop=30 \quad ; \quad p=0.9 \quad ; \quad MaxIt=80000$$

Nous représentons sur la figure suivante III.19 la trajectoire planifiée avec FPA, après avoir simulé l'algorithme ce dernier, en utilisant les paramètres précédents.



**Figure III.19:**la trajectoire planifiée avec FPA

3. L'algorithme IWO :

On utilise ces paramètres suivants :

IPop=30 ; Mpop=60 ; Sigma= 0.9999995 ; MaxIt= 80000

Nous représentons sur la figure III.20 la trajectoire planifiée avec IWO, après avoir simulé l'algorithme IWO, en utilisant les paramètres précédents. les figures III.21-III.22-III.23 représentent les cout des trajectoire obtenues.

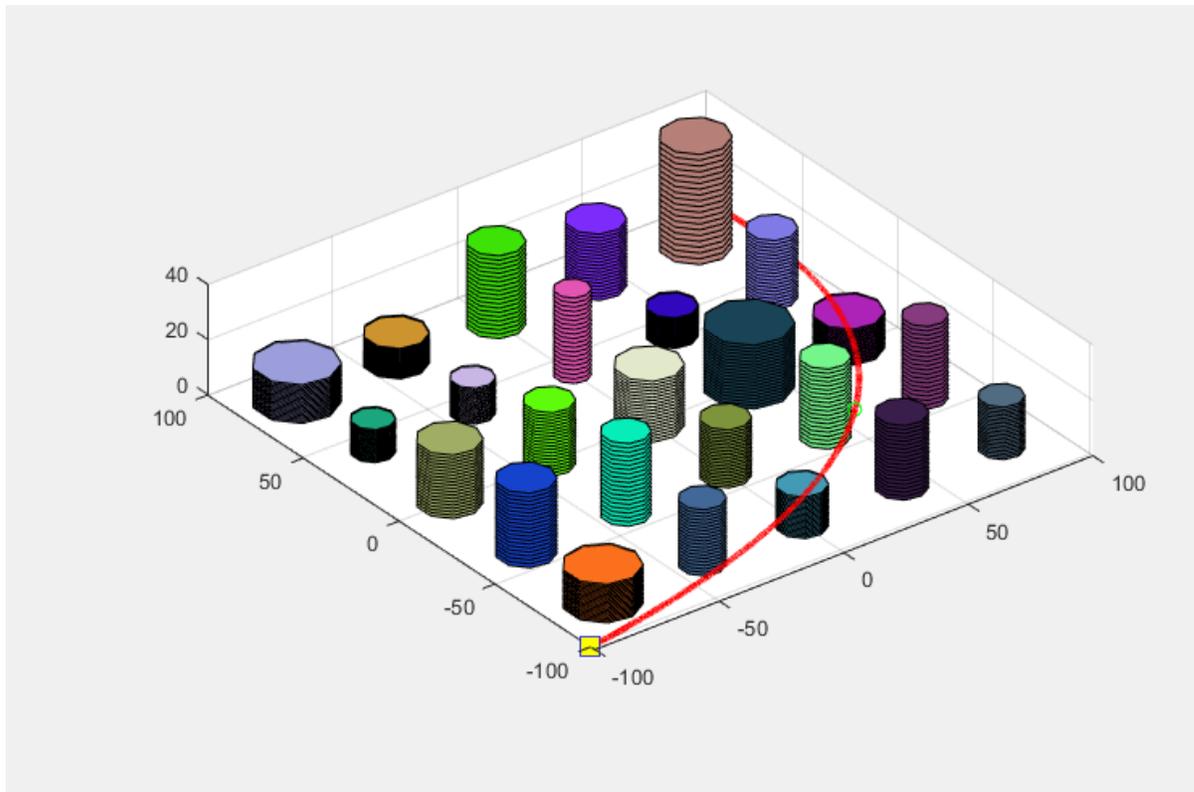


Figure III.20:La trajectoire planifiée avec IWO

4. L'évolution de PSO :

La figure suivante(III.21) montre l'évolution de PSO par rapport au nombre d'itération, ou on a trouvé la valeur de Global Best est égale :327,5958.

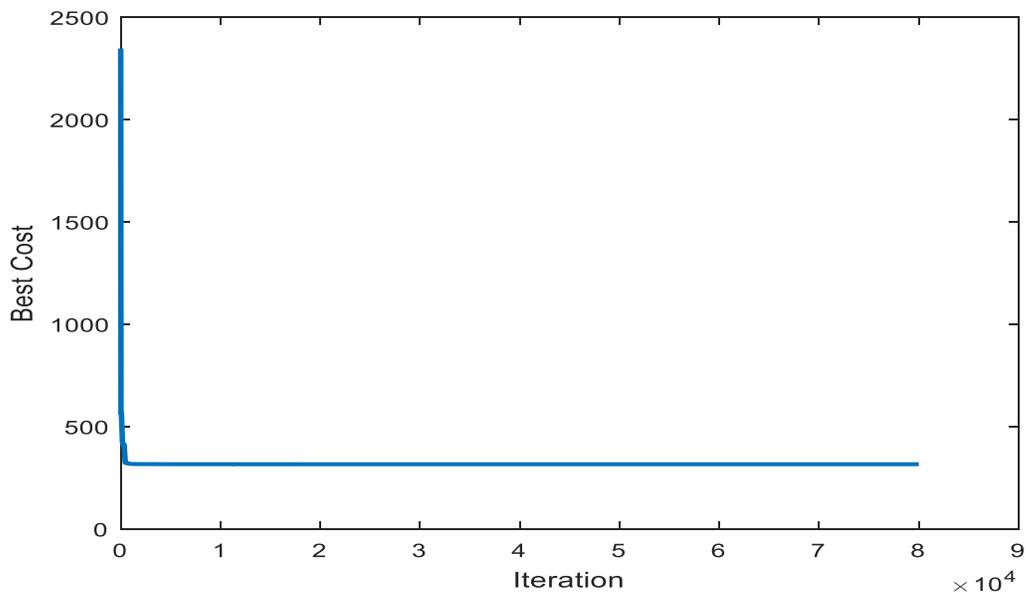
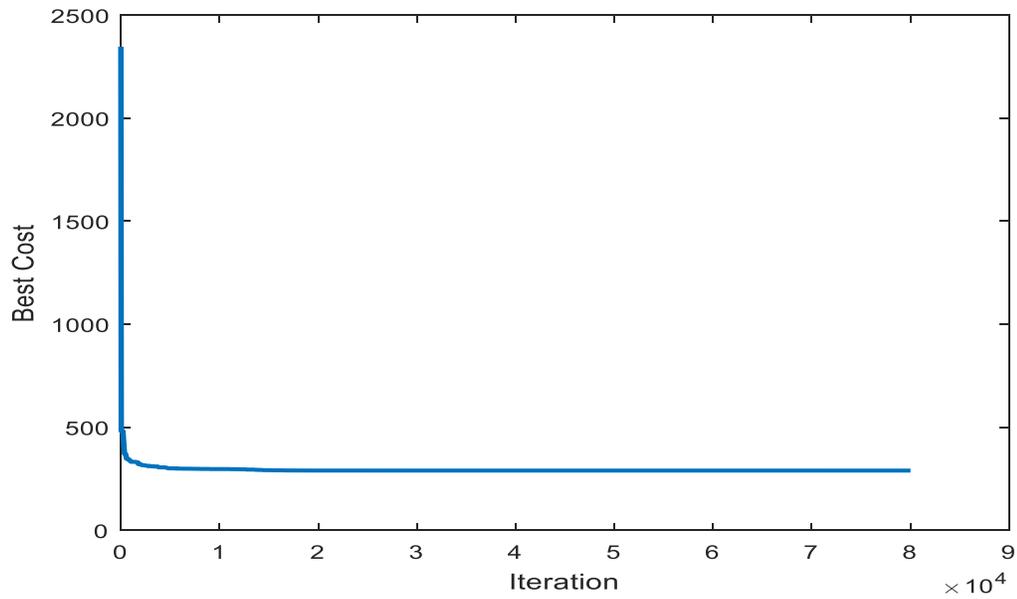


Figure III.21:L'évolution de PSO

5. L'évolution d'APF :

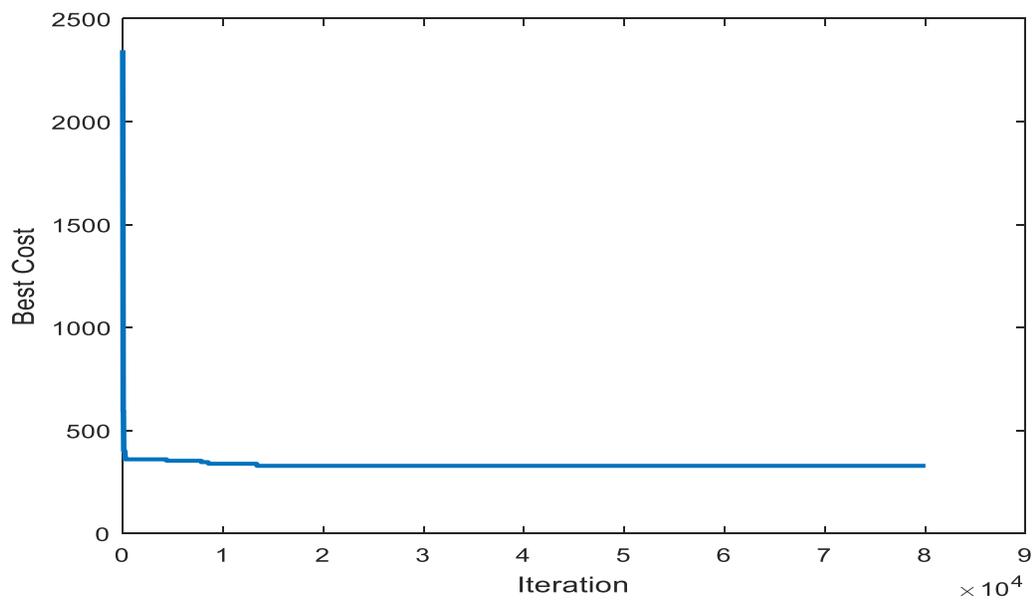
La figure suivante (III.22) montre l'évolution d'FPA par rapport au nombre d'itération, ou on a trouvé la valeur de Global Best est égale :315.3609



**Figure III.22:**L'évolution d'FPA

6. L'évolution d'IWO:

La figure suivante (III.23) montre l'évolution d'IWO par rapport au nombre d'itération, ou on a trouvé la valeur de Global Best est égale :289.770



**Figure III.23:**L'évolution d'IWO

### 5.2. Interprétation des résultats :

- Les figures (III.18-III.20) représentent la trajectoire planifiée de la position initial à la position finale en évitant tous les obstacles par avec les algorithmes PSO,FPA et IWO respectivement.
- Les figures (III.21-III.23) montre l'évolution des algorithmes PSO, FPA et IWO. respectivement
- On remarque que la longueur de trajectoire planifier par PSO est  $L=315.3609$ , par FPA est  $L=289.7701$  et par IWO est  $L=327.5958$ , sachant que le nombre de générations est le même pour les trois algorithmes.
- Les trajectoires se convergent plus rapidement au début d'itérations puis se stagne.
- On constate que les paramètres de chaque algorithme ont l'influence sur le comportement des trajectoire .

### 6. Poursuite de trajectoire :

On présente dans les figures suivantes les résultats obtenues pour la poursuite de la trajectoire planifiée par les trois algorithmes en utilisant la commande PID.

#### L'algorithme PSO :

Avec les paramètres précédentes nous allons faire une poursuite de la trajectoire par PSO afin d'obtenir les trajectoires obtenue pour notre système , les figures ci-dessous montrent les résultats :

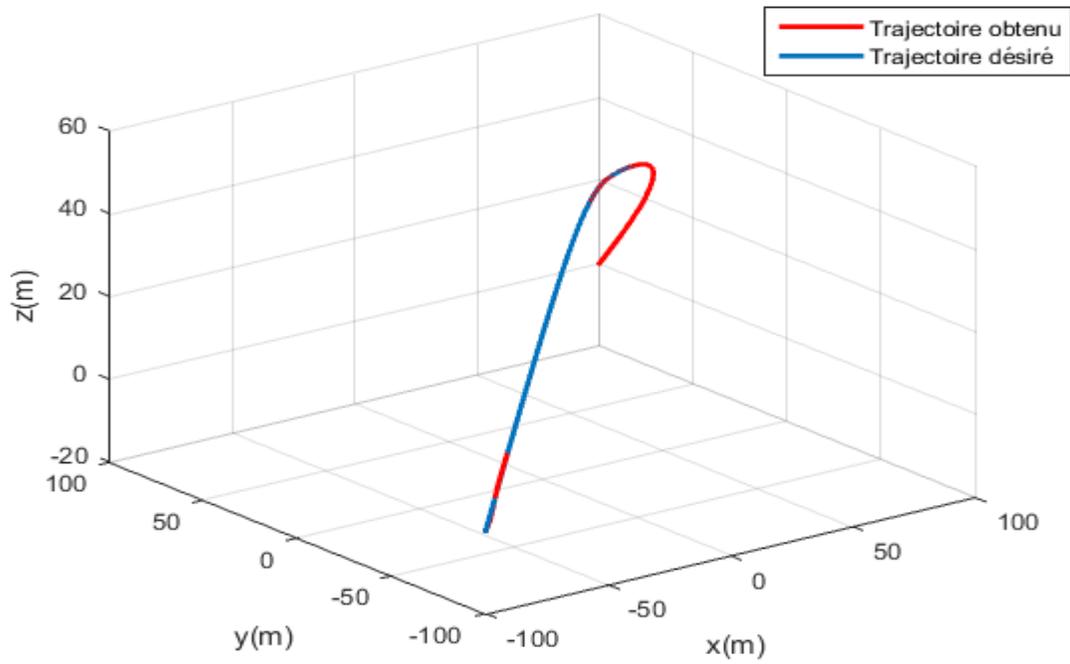


Figure III.24: La poursuite de la trajectoire planifiée

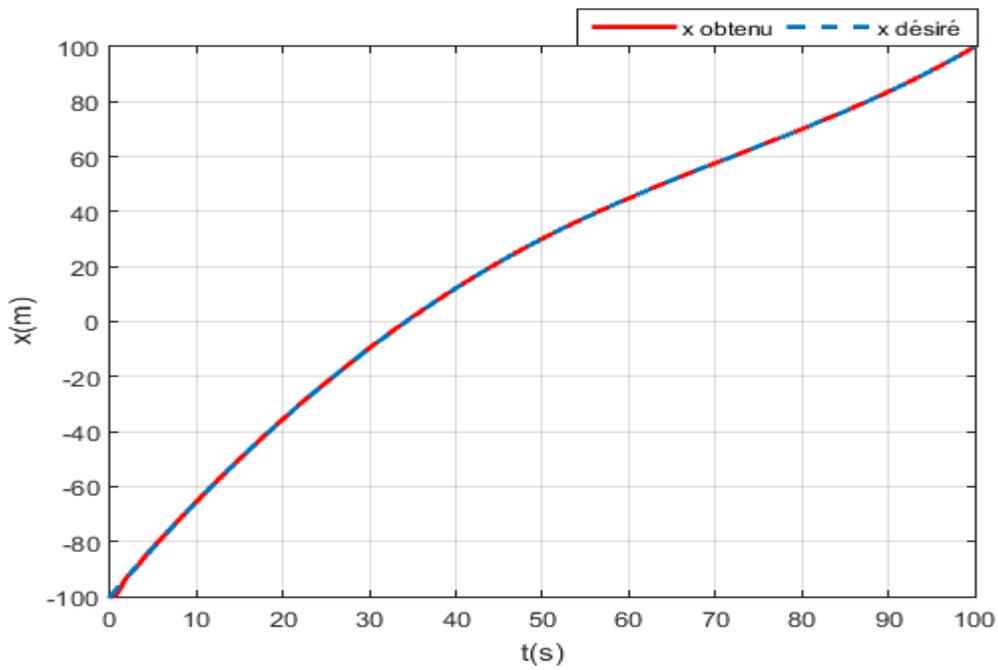


Figure III.25: La réponse en position x

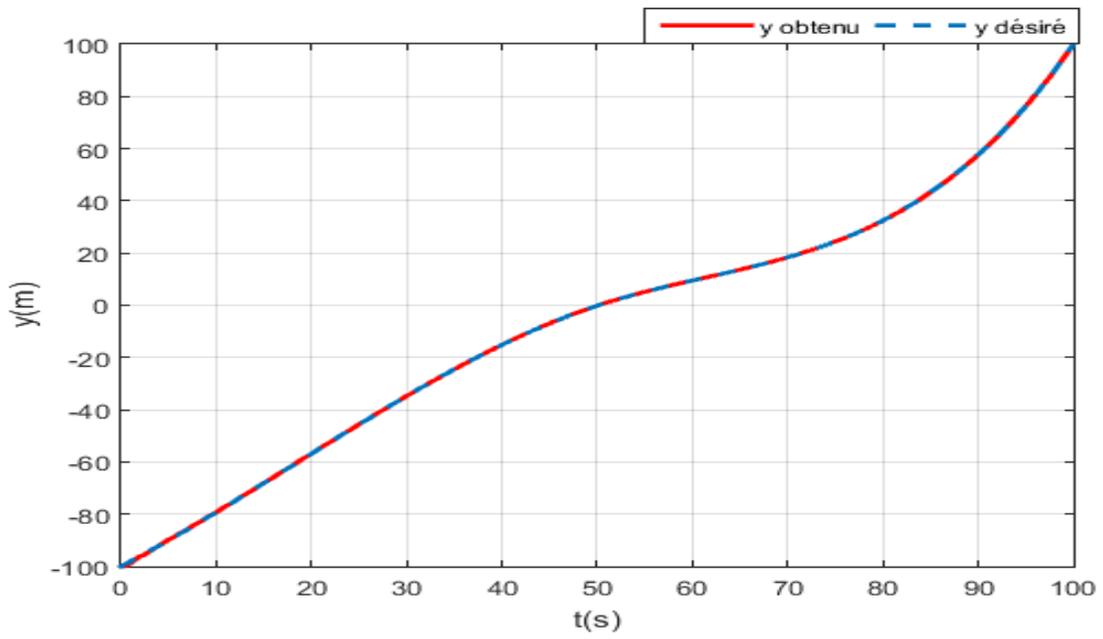


Figure III.26: La réponse en position  $y$

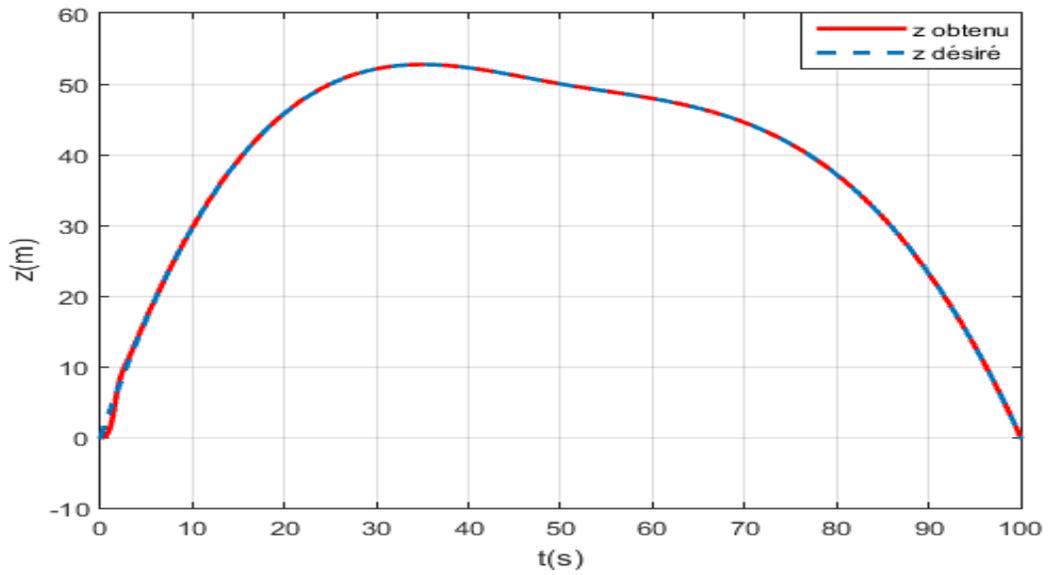
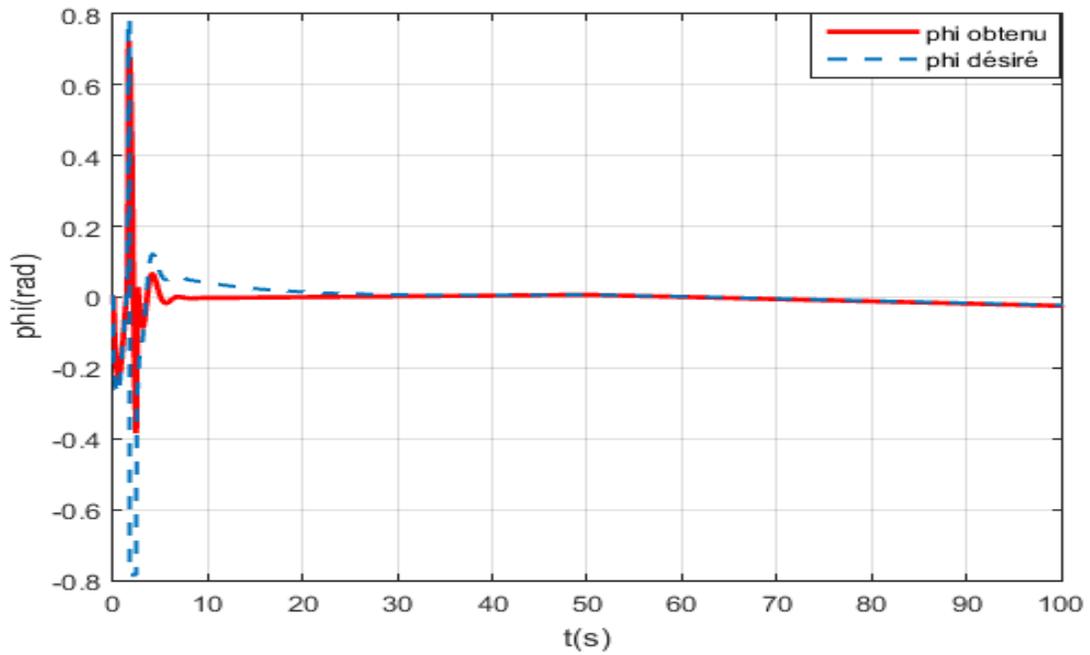


Figure III.27: La réponse en position  $z$



FigurIII.28 :La réponse en altitude phi

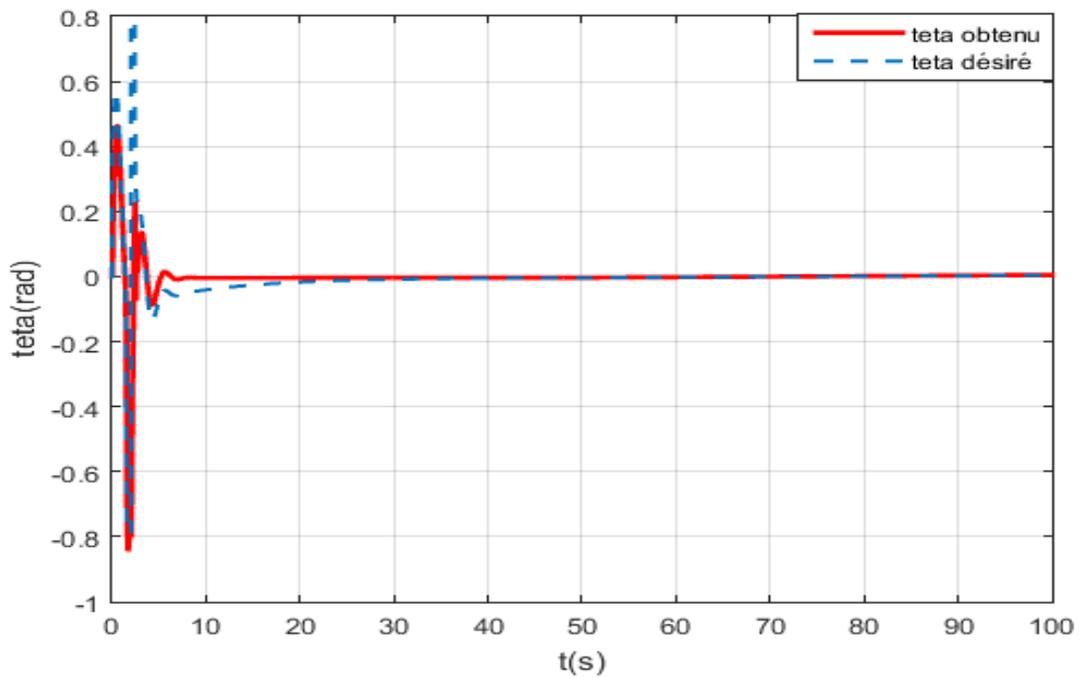


Figure III.29: La réponse en altitude teta

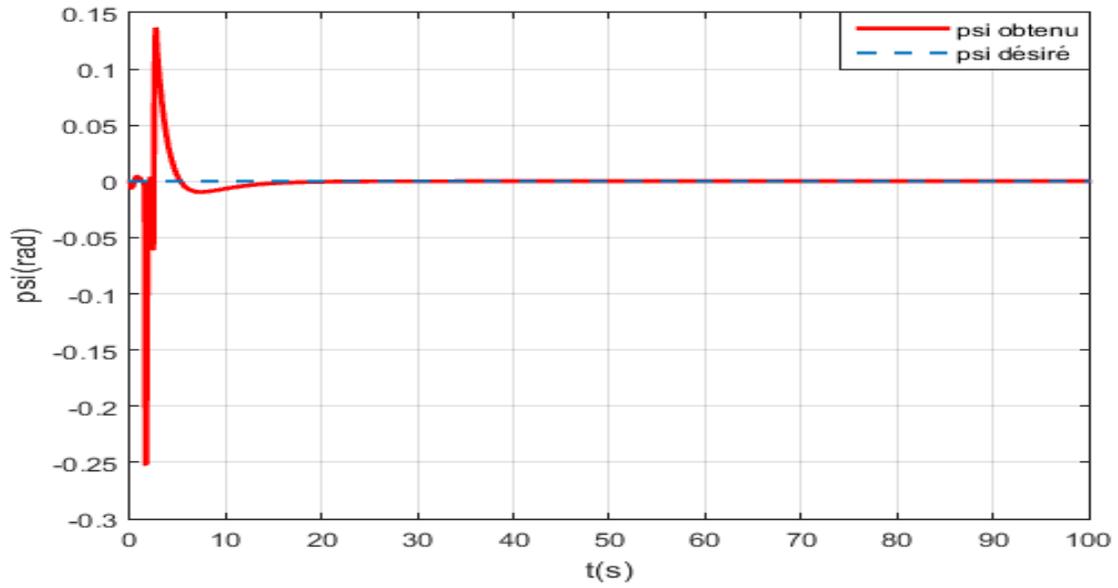


Figure III.30: La réponse en altitude psi

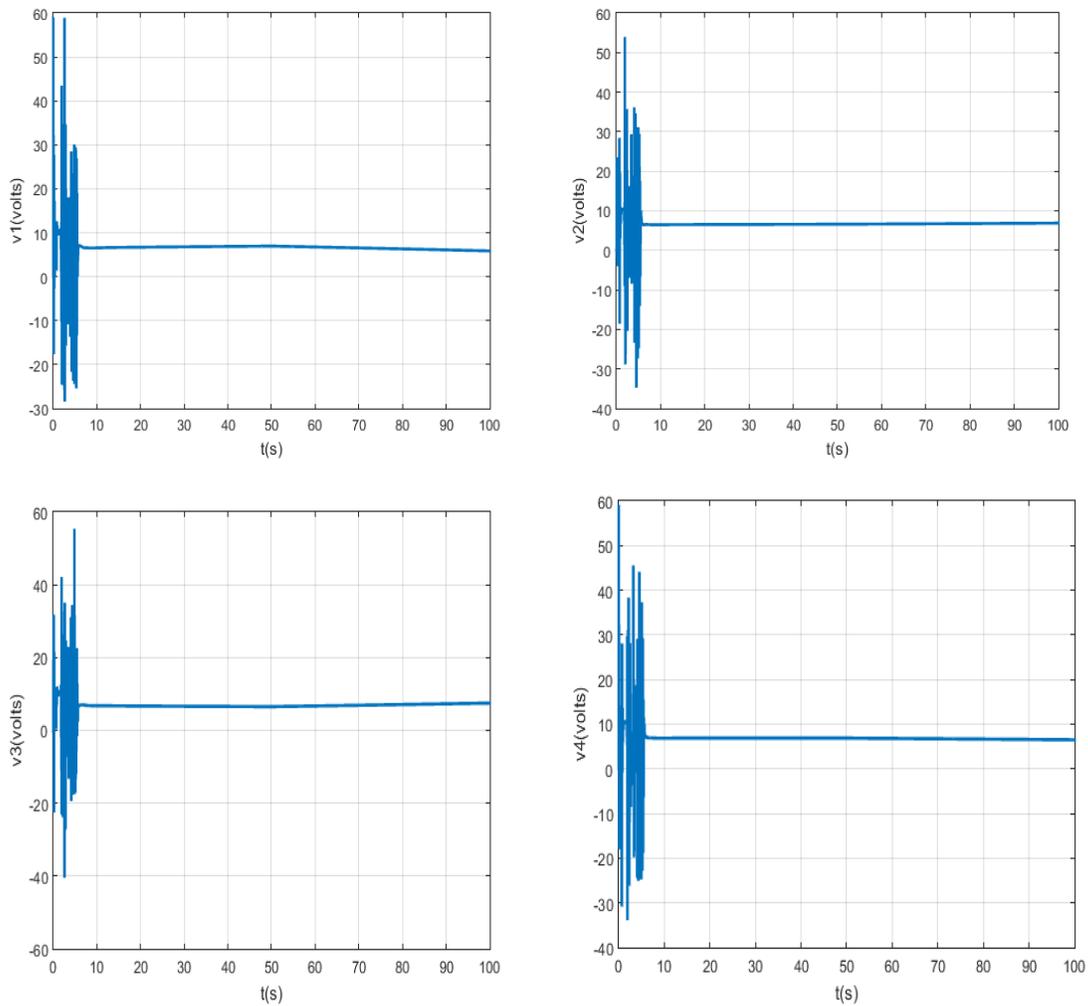


Figure III.31: Les tensions des moteurs

L'algorithme FPA:

Avec les paramètres précédentes nous allons faire une poursuite de la trajectoire par APF afin d'obtenir les trajectoires obtenue pour notre système , les figures ci-dessous montrent les résultats :

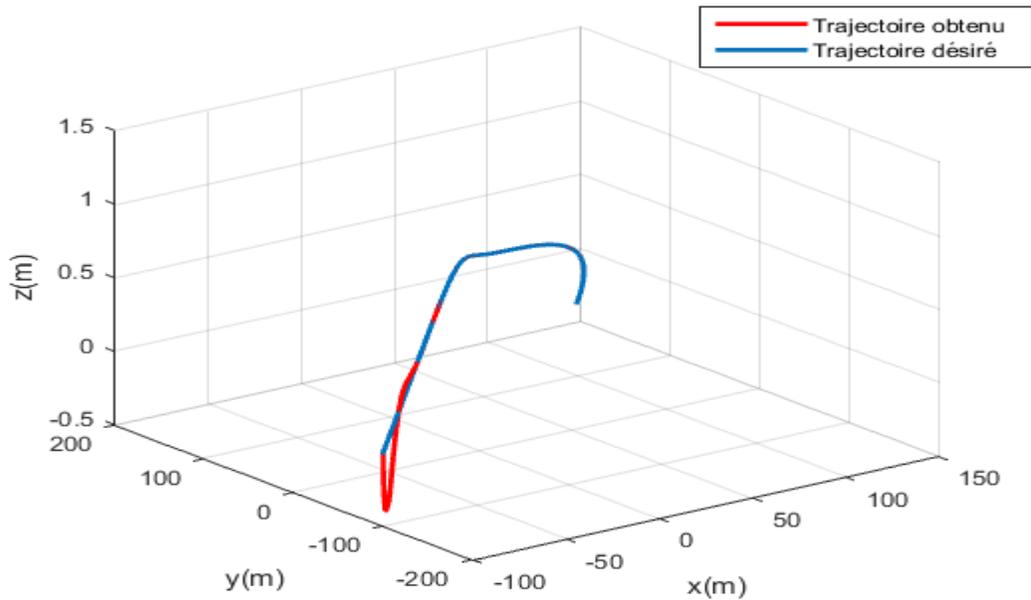


Figure III.32:La poursuite de la trajectoire planifiée

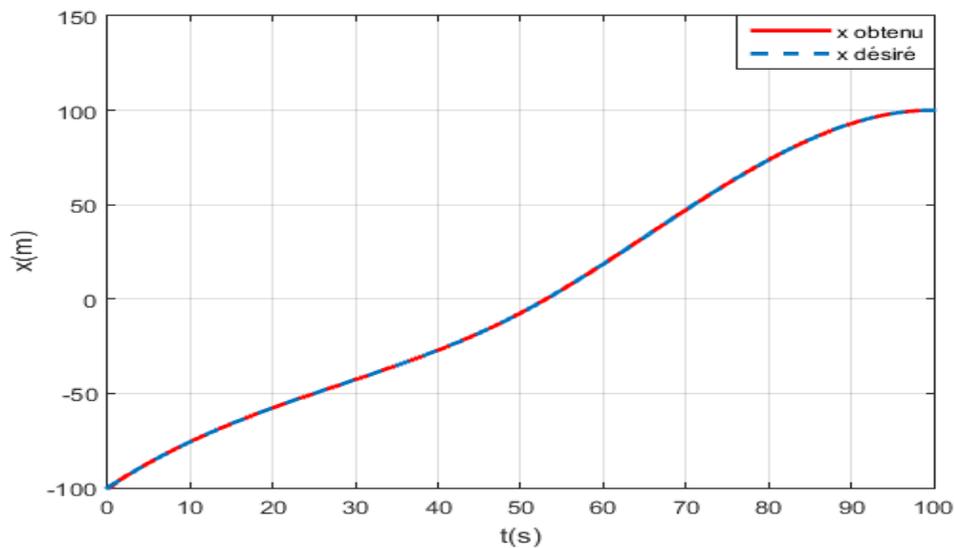


Figure III.33:Laréponse en x

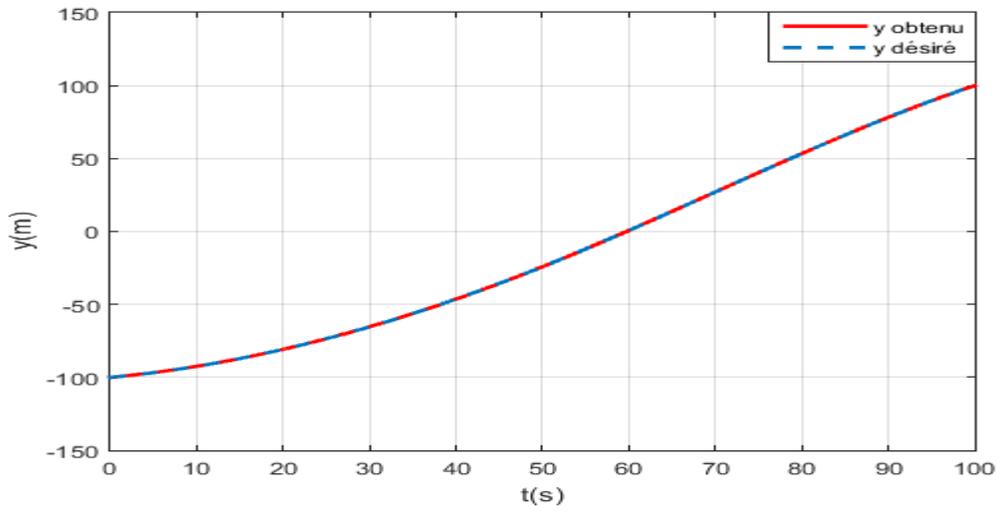


Figure III.34: La réponse en y

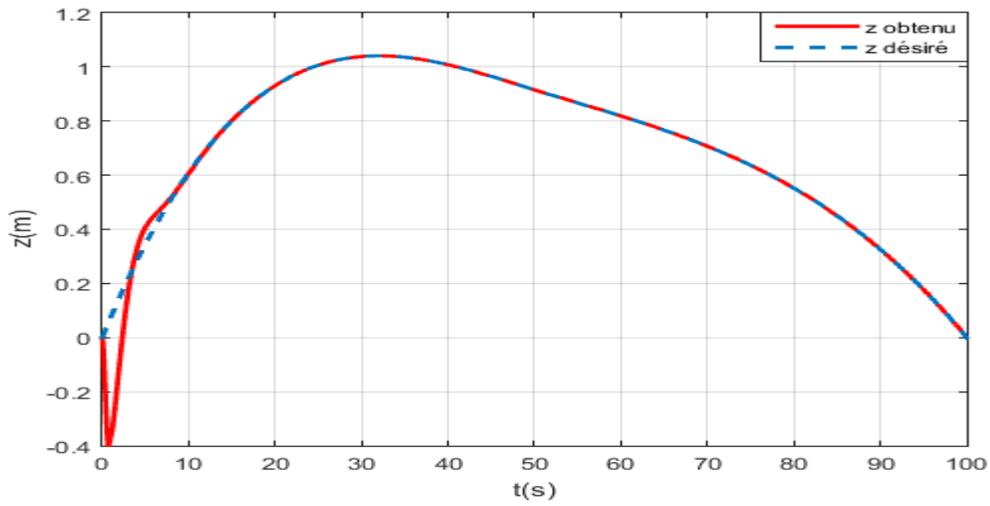


Figure III.35: La réponse en z

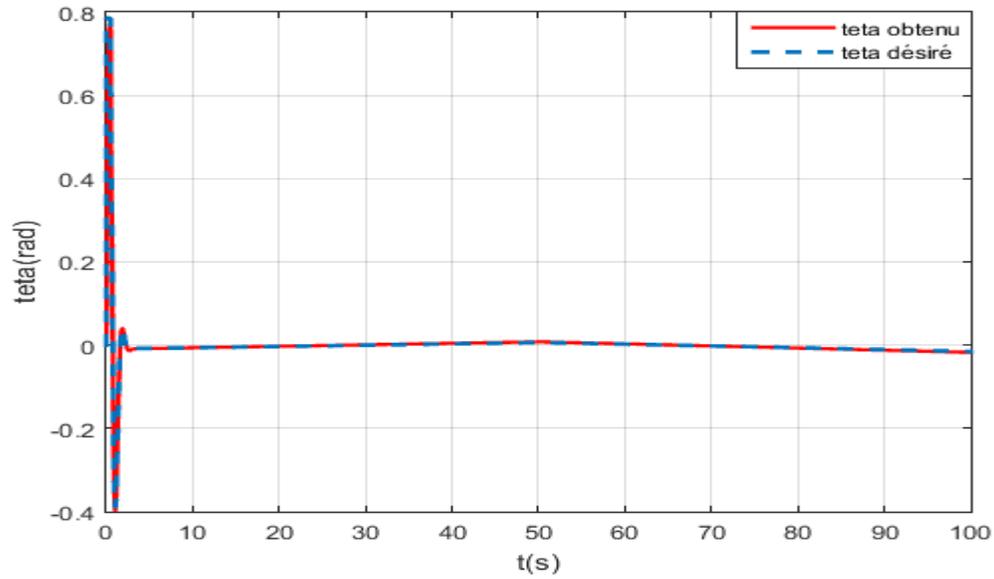


Figure III.36: La réponse en altitude teta

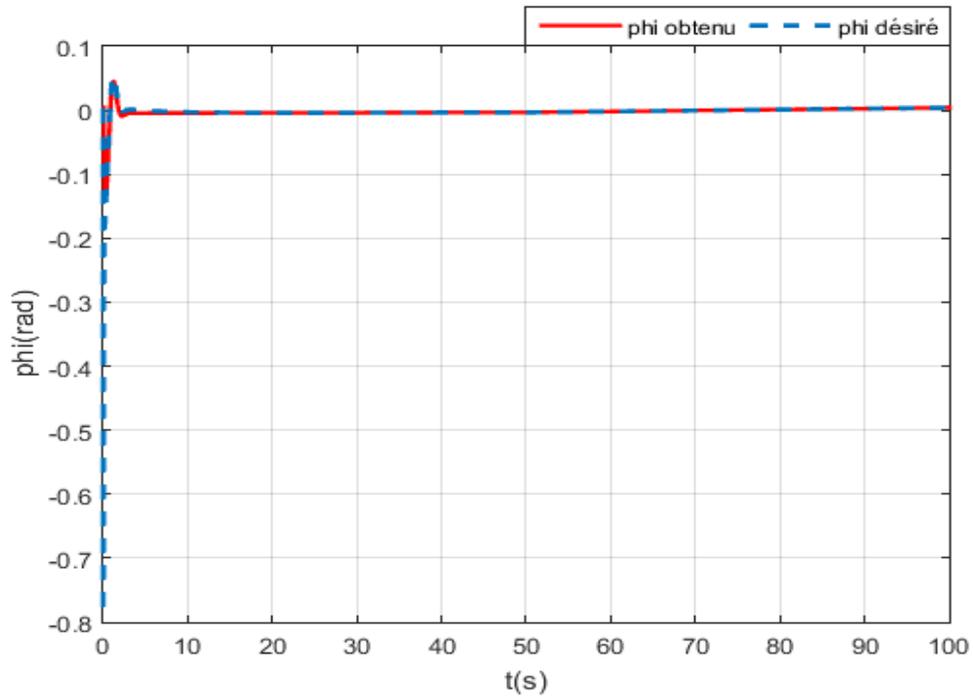


Figure III.37: La réponse en altitude phi

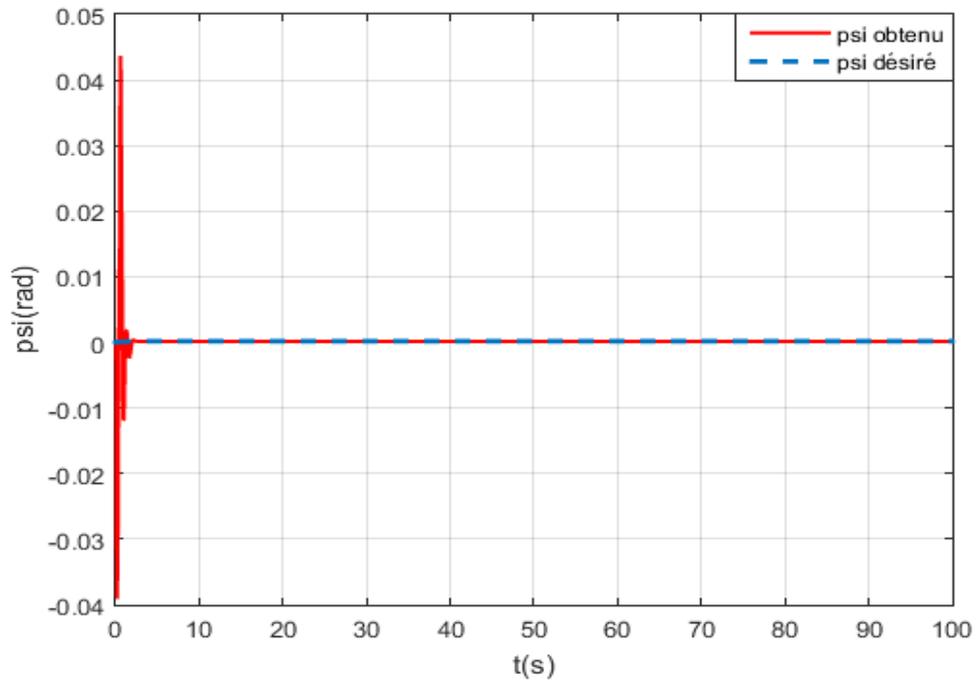


Figure III.38: La réponse en altitude  $\psi$

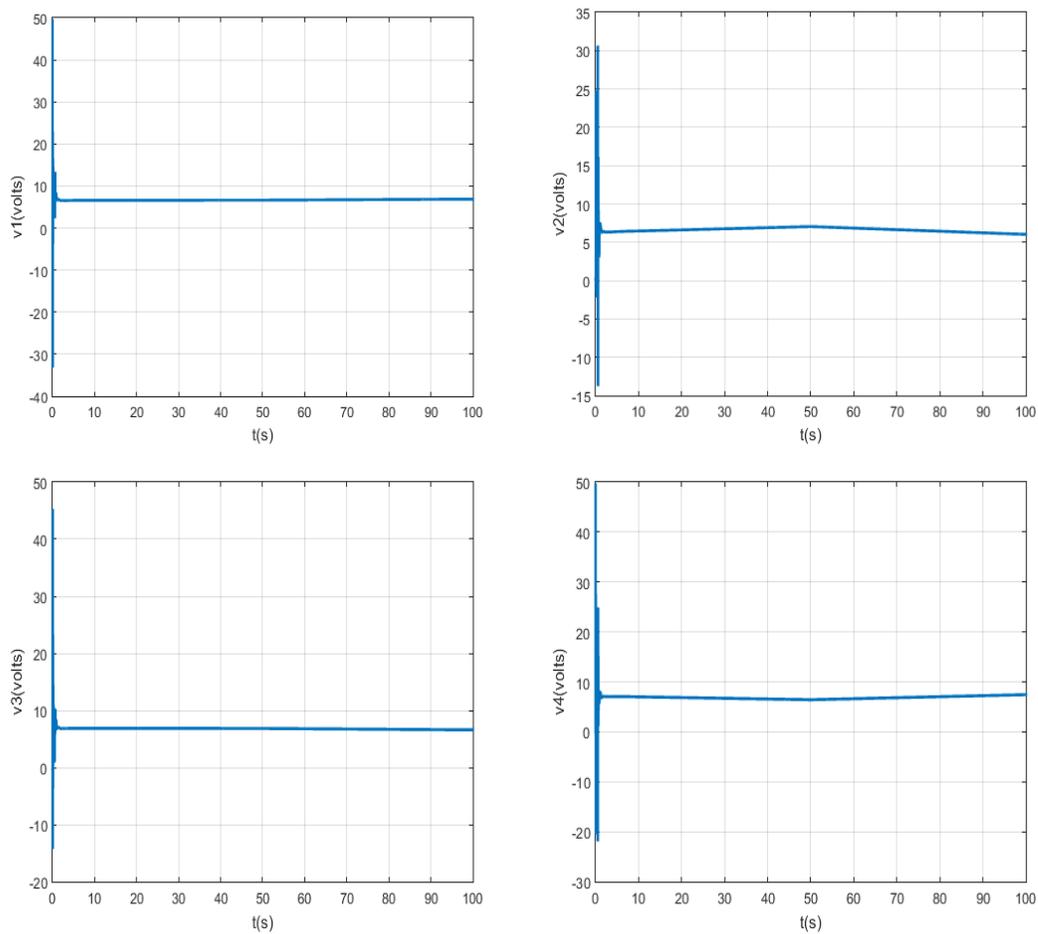
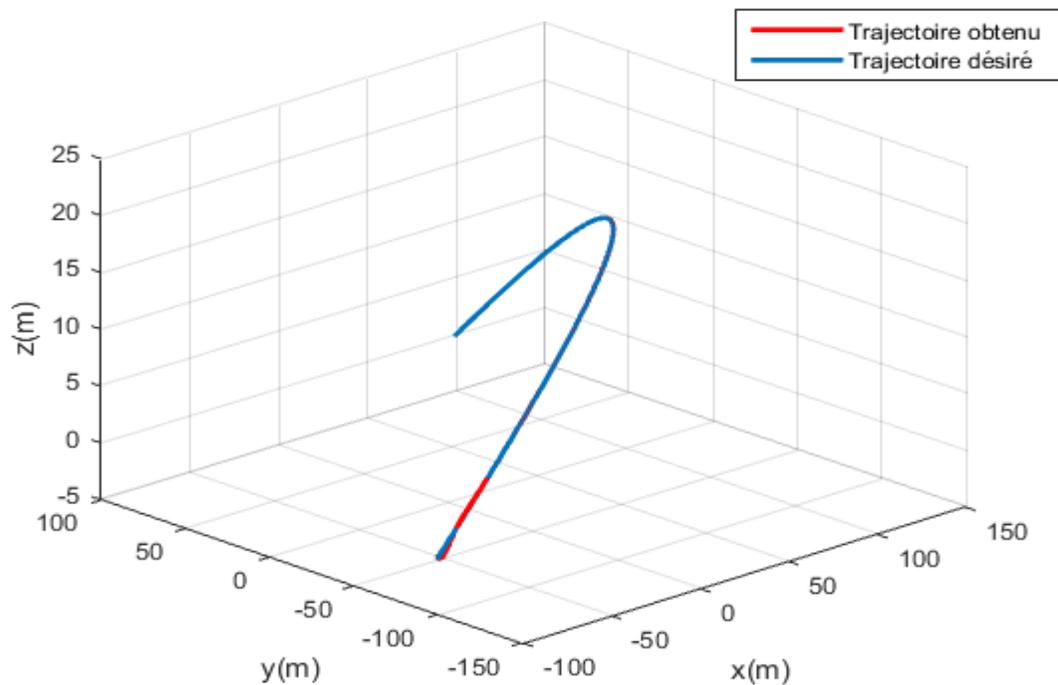


Figure III.39: Les tensions des moteurs

L'Algorithme IWO :

Avec les paramètres précédentes nous allons faire une poursuite de la trajectoire par IWO afin d'obtenir les trajectoires obtenue pour notre système , les figures ci-dessous montrent les résultats :



**Figure III.40:** La poursuite de la trajectoire planifiée

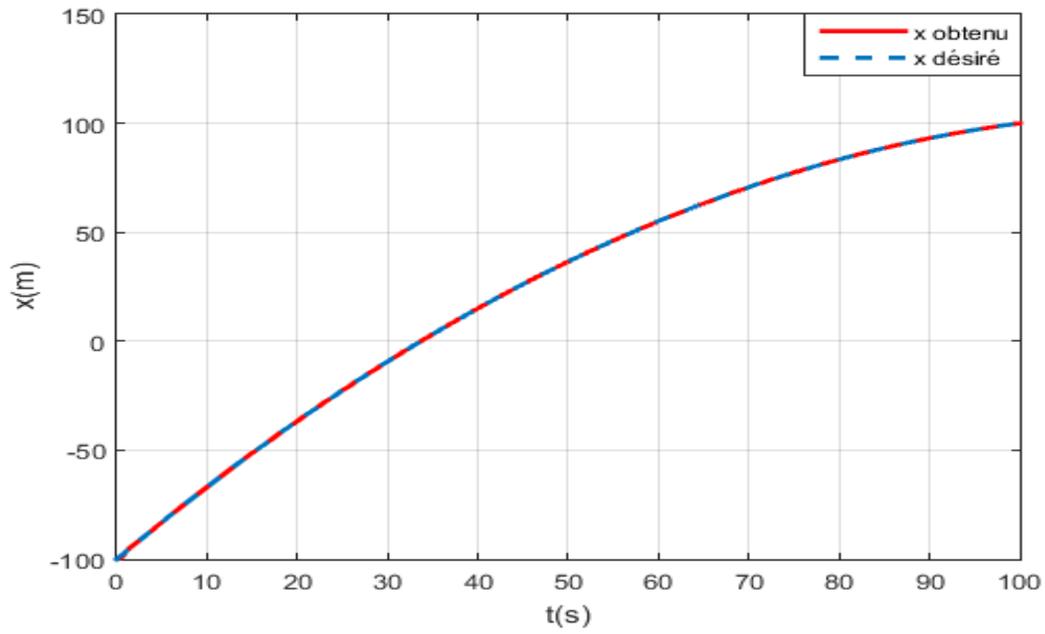


Figure III.41:La réponse en x

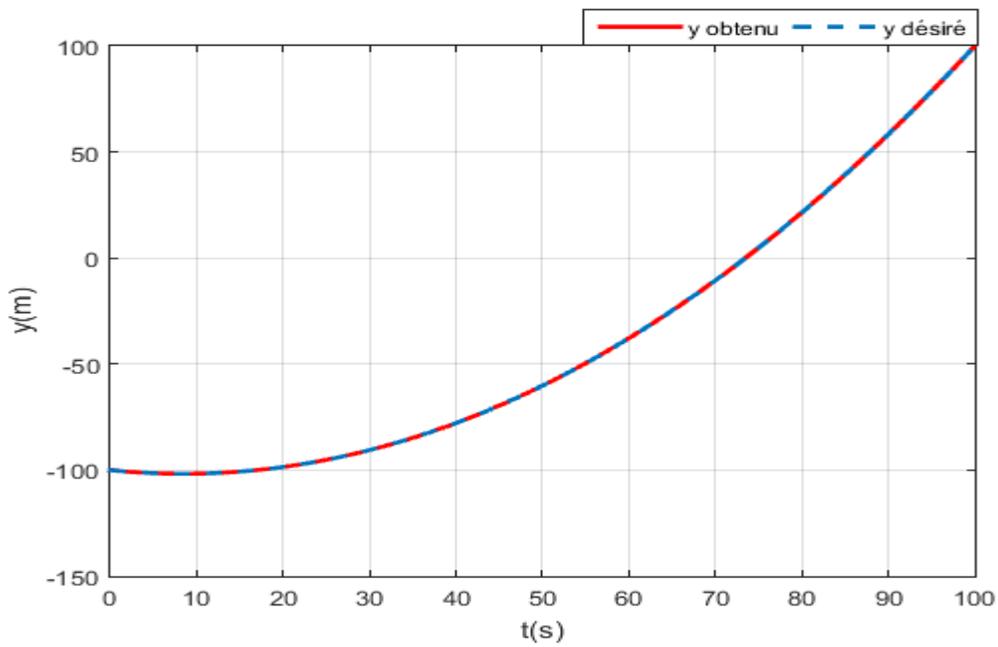


Figure III.42:La réponse en y

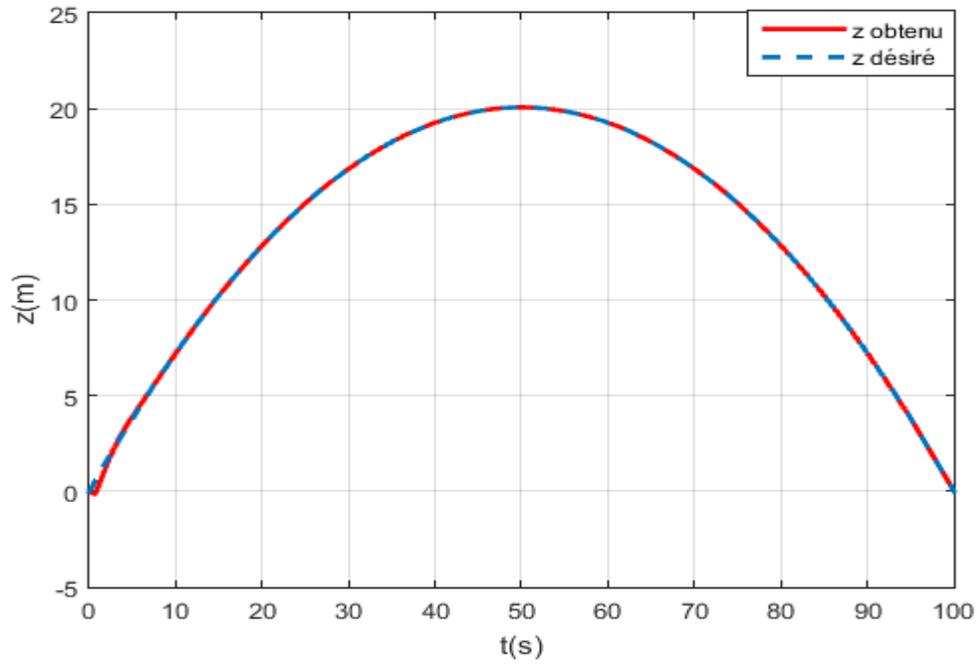


Figure III.43:La réponse en  $z$

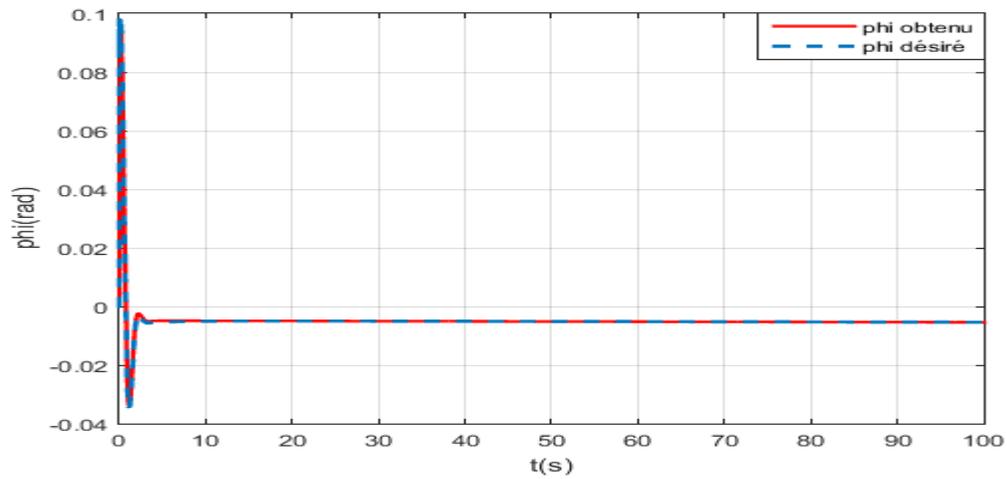


Figure III.44:La réponse en altitude  $\phi$

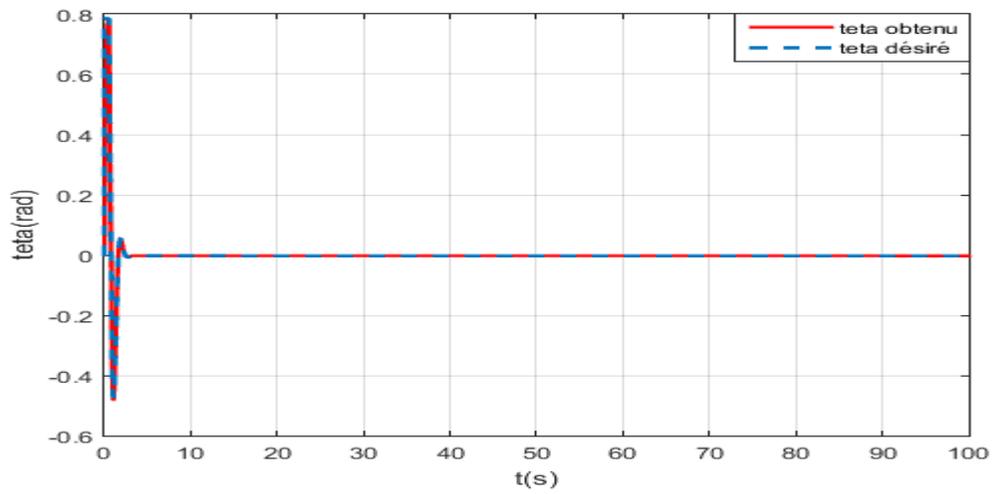


Figure III.45: La réponse en altitude teta

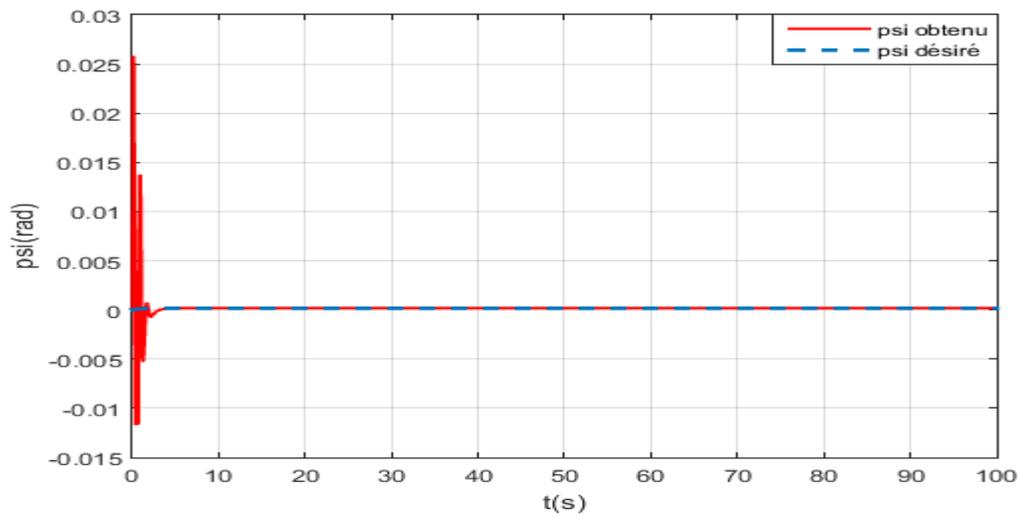
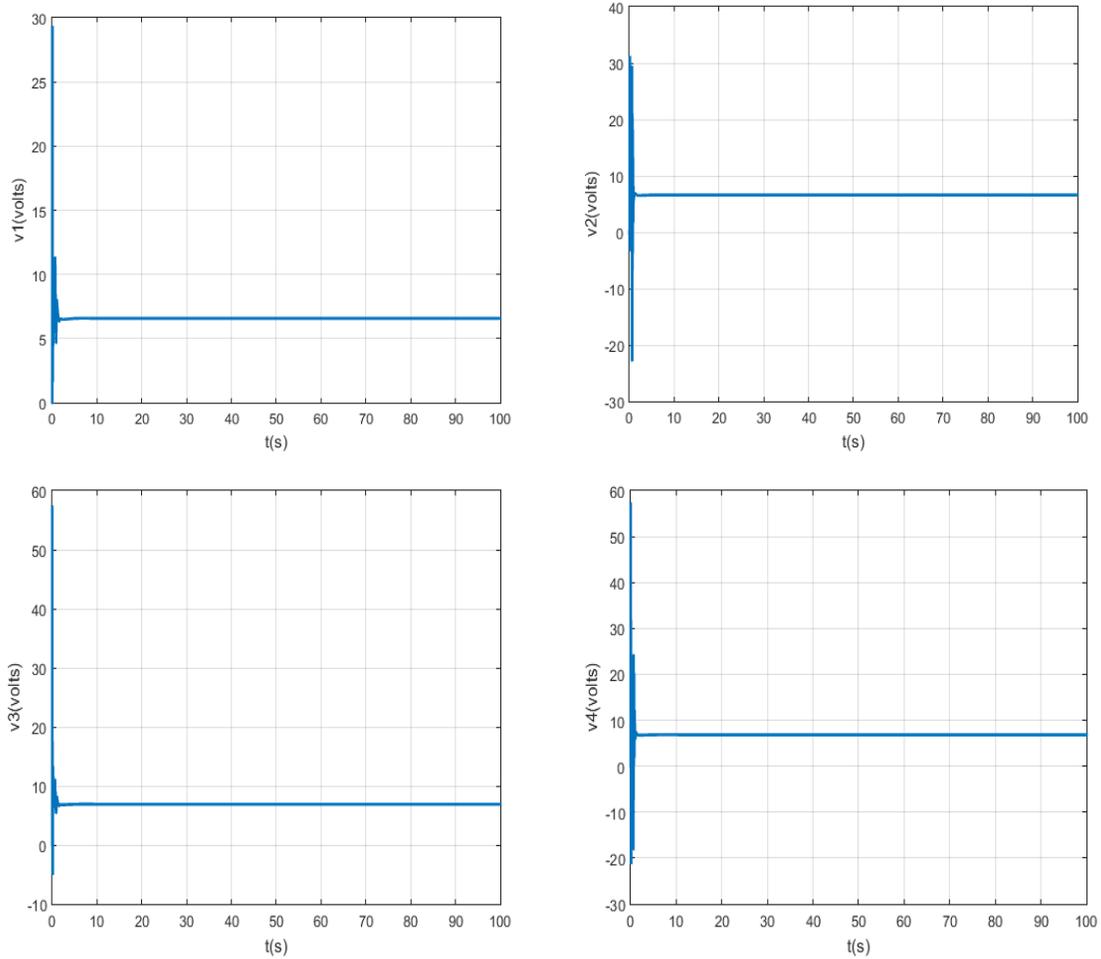


Figure III.46: La réponse en altitude psi



**Figure III.47:** Les tensions des moteurs

Le tableau suivant III.3, représente la moyenne des erreurs pour chaque algorithme.

**Tableau III.3:**  
La moyenne des erreurs

	PSO	APF	IWO
<b>Erreur moyenne</b>	<b>0.0022</b>	<b>5.6580*10<sup>-04</sup></b>	<b>7.2037*10<sup>-04</sup></b>

**6.1. Interprétation des résultats :**

- Les figures(III.24-III.40):montrent que la trajectoire désirée et la trajectoire obtenue sont presque superposées.
- Les figures (III.25-III. 27)et (III.33-III.34) et (III.41-III.43)montrent le résultat obtenu en termes de poursuite des déférents mouvements.
- La figure III.35 montre la réponse en z , on remarque qu'y a une chute d'altitude à t=0 en raison des moteurs qui n'ont pas atteint la vitesse nécessaire.

- Les figures (III.28-III.29) présentent le déplacement latérale et longitudinal , on remarque une erreur de 0.4 rad entre les angles, les figures (III.36-III.37) montrent les mêmes allures avec une erreur de 0.7 rad entre les angles de roulis, les figures (III.44-III.45) montrent une meilleure poursuite de trajectoire .
- Les figures (III.30,III.38,III.46) montrent la réponse en altitude de lacet avec un dépassement au début puis la trajectoire se stabilise .On constate que la force de portance a un rôle important qu'elle doit être faible pour réduire le dépassement.
- Les figures (III.31,III.39,III.47)représentent les tensions des moteurs, les trois trajectoires peuvent être réalisées avec des tensions inférieures de 60volt. On constate que le drone ne consomme pas beaucoup d'énergie. Ceci est dû à son faible poids.
- D'après le tableau (III.4) on remarque que l'erreur de poursuite est bien minimisée pour IWO c.-à-d. le drone arrive à suivre la trajectoire avec une grande précision on déduit que les réglages des algorithmes et les paramètres ont un rôle important pour obtenir les meilleurs résultats.
- L'algorithme IWO offre une très bonne poursuite par rapport aux autres algorithmes avec une erreur moyenne très faible grâce à les gains optimisé et les réglages des paramètres. L'algorithme IWO présente aussi des performances qui lui permettent de mieux optimiser la trajectoire.

## 7. Conclusion

Ce chapitre aborde la planification de la trajectoire du drone avec l'intelligence des plantes, afin de trouver la meilleure trajectoire optimale 3D, en utilisant trois algorithmes PSO, FPA et IWO.

Nous avons présenté les principales méthodes de planification de trajectoire, leurs avantages et leurs inconvénients. On a également présenté la commande PID.

Nous avons aussi abordé l'algorithme PSO et nous l'avons utilisé comme algorithmes de comparaison pour mieux évaluer les performances des algorithmes IWO et FPA.

Finalement, nous avons utilisé les algorithmes FPA, IWO et PSO à la planification de trajectoire du drone dans un milieu présentant des obstacles. La poursuite de trajectoire est assurée par le contrôleur PID.

Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par PSO, cette étude montre que les algorithmes IWO et FPA présentent les meilleurs résultats très compétitifs.

# Conclusion Générale

Ce travail est un mémoire master en Automatique et système effectué au sein de l'université A. MIRA-Bejaia.

Dans ce travail, nous avons décrit et implémenté deux méthodes inspirées du comportement des plantes destinées à la planification de trajectoires pour les drones et l'évitement d'obstacles.

Le développement technologique que connaît le domaine de l'électronique numérique et l'électronique de puissance ainsi que la grande évolution des calculateurs et de la miniaturisation des composants électroniques ont beaucoup facilité l'essor des drones.

Notre objectif est de réussir l'utilisation de l'intelligence des plantes pour le développement d'une méthode de planification de trajectoire pour des drones. Pour ce faire, nous avons conduit notre travail en trois étapes.

La première partie consiste à présenter l'intelligence des plantes. Il s'agit de l'algorithme IWO (invasive weed optimization) et FPA (Flower Pollinisation Algorithm), afin de les utiliser pour résoudre des problèmes d'optimisations. Le problème de planification de trajectoire d'un drone avec évitement obstacles est ici résolu par les deux méthodes FPA et IWO.

Dans le deuxième chapitre, nous avons introduit des généralités sur les drones. On a présenté un ensemble des concepts (définition, composants, évolution, classification, domaines d'utilisation et a réglementation). Ensuite, nous avons abordé la modalisation d'un drone quadrotor, afin de pouvoir établir un modèle dynamique en utilisant le formalisme de Newton-Euler qui est utilisé à la suite de ce travail.

L'application des algorithmes de planification de trajectoires sur le drone est de nos jours en constante croissance. La notion de la planification de trajectoire a été abordée dans le dernier chapitre. On s'est intéressé à l'utilisation des méthodes FPA et IWO pour la planification de trajectoire du QUAD et nous avons comparé les résultats obtenus à la méthode PSO.

Grâce aux résultats obtenus, on remarque que l'algorithme IWO est le meilleur par rapport aux deux autres algorithmes FPA et PSO. La poursuite de trajectoire est assurée par un contrôleur PID.

### **Perspectives**

Ce travail peut être amélioré dans l'avenir. Du moins, nous proposons dans les travaux à venir de :

1. Utilisation des bruits pour estimer la robustesse de la commande
2. Comparer la commande PID à d'autres méthodes plus sophistiquées
3. Comparer la méthode à des méthodes en ligne.
4. Réaliser une application réelle
5. Validation par des vols d'essai

## Référence bibliographique

- [1] BENNADJI, D. L'algorithme de pollinisation des fleurs.
- [2] Hachimi, H. (2013). Hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications (Doctoral dissertation, Rouen, INSA).
- [3] ELHOUDA, C.N. (2021). Utilisation des algorithmes métaheuristique dans L'optimisation numérique.
- [4] Benaichouche, A.N. (2014). Conception de métaheuristiques d'optimisation pour la segmentation d'images: application aux images IRM du cerveau et aux images de tomographie par émission de positons (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- [5] CHITOUR, H.S. (2019). Introduction à l'optimisation par des algorithmes inspirés de la nature .
- [6] Akyol, S., & Alatas, B. (2017). Plant intelligence based metaheuristic optimization algorithms. *Artificial Intelligence Review*, 47(4), 417-462.
- [7] Yang, X. S. (2012, September). Flower pollination algorithm for global optimization. In *International conference on unconventional computing and natural computation* (pp. 240-249). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8] N. M. Waser., (1986), Flower constancy: definition, cause and measurement., *The American Naturalist*, 127 (5), 596-603.
- [9] Yang, X. S. (2020). *Nature-inspired optimization algorithms*. Academic Press.
- [10] Alyasseri, Z. A. A., Khader, A. T. Al-Betar, M. A. Awadallah, M. A., & Yang, X. S. (2018). Variants of the flower pollination algorithm: a review. In *Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization* (pp. 91-118). Springer, Cham.
- [11] Flower Pollination by biology. [tutorvista.com/animal-kingdom](http://tutorvista.com/animal-kingdom), Pearson, 2005
- [12] Alyasseri, Z. A. A., Khader, A. T. Al-Betar, M. A., Awadallah, M. A., & Yang, X. S. (2018). Variants of the flower pollination algorithm: a review. *Nature-inspired algorithms and applied optimization*, 91-118.
- [13] Osama Abdel\_Raouf, Ibrahim El-Henawy and Mohamed Abdel-Baset. A Novel Hybrid Flower Pollination Algorithm with Chaotic Harmony Search for Solving Sudoku Puzzles., *Journal of Modern Education and Computer Science*, 2014, pp 38-44.
- [14] O. Abdel-Raouf, M. Abdel-Baset, I. El-henawy, .A New Hybrid Flower Pollination Algorithm for Solving Constrained Global Optimization Problems., *International Journal of Applied Operational Research* Vol. 4, No. 2, pp. 1-13, Spring 2014
- [15] Gaganpreet Kaur Dheerendra Singh, Manjinder Kaur, Robust and Efficient. RGB. based Fractal Image Compression: Flower Pollination based Optimization., *International Journal of Computer Applications* (0975 .8887), Volume 78. No.10, 2013
- [16] Gaganpreet Kaur, Dr. Dheerendra Singh, Pollination Based Optimization for Color Image Segmentation., *International Journal of Computer Engineering and Technology* Volume 3, Issue 2, 2012
- [17] Rui Wang and Yongquan Zhou, Flower Pollination Algorithm with Dimension by Dimension Improvement, Hindawi Publishing Corporation *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2014, Article ID 481791.n

- [18] R. Prathiba, M. Balasingh Moses, S. Sakthivel, Flower Pollination Algorithm Applied for Different Economic Load Dispatch Problems, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol 6 No 2 Apr-May 2014.
- [19] Gestion des mauvaises herbes et de la fertilité du sol en production biologique de bleuets. Agriculture et Agroalimentaire, Canada, Rapport final de recherche E2006-06, 10.
- [20] Kenane, El Hadi. Contribution à l'optimisation d'un réseau d'antennes intelligentes au système UMTS. Diss. 2018.
- [21] MCCULLY K. et R. TREMBLAY et G. CHIASSON, 2004. Guide de lutte intégrée contre les mauvaises herbes dans les cultures de fraises. Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Aquaculture du Nouveau-Brunswick (MAPANB), 15 p. and Applied Optimization (pp. 91-118). Springer, Cham.
- [22] Karimkashi S, Kishk AA (2010) Optimisation invasive des mauvaises herbes et ses caractéristiques en électromagnétisme.
- [23] Z. Zaharis, P. Lazaridis, J. Cosmas, C. Skeberis and T. Xenos, "Synthesis of a Near-Optimal High-Gain Antenna Array with Main Lobe Tilting and Null Filling Using Taguchi Initialized Invasive Weed Optimization", *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 60, no. 1, pp. 120-127, Mar. 2014.
- [24] B. Dadalipour, A. R. Mallahzadeh and Z. Davoodi-Rad, "Application of the Invasive Weed Optimization Technique for Antenna Configurations", *Proc. Loughborough Antennas Propag. Conf.*, Loughborough, pp. 425-428, Mar. 2008.
- [25] M. Sahraei-Ardakani M. Roshanaei, A. Rahimi-Kian and C. Lucas, "A study of Electricity Market Dynamics Using Invasive Weed Optimization", *Proc. IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*, pp. 276-282, Dec. 2008.
- [26] H. Sepehri-Rad and C. Lucas, "A Recommender System Based on Invasive Weed Optimization Algorithm", *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 4297-4304, Sep. 2007.
- [27] A.R. Mehrabian and A. Yousefi-Koma, "Optimal Positioning of Piezoelectric Actuators of Smart Fin Using Bio-Inspired Algorithms", *Aerospace Science & Technology*, vol. 11, no. 2-3, pp. 174-182, Mar. 2007.
- [28] Rosenbrock, HH (1960). Une méthode automatique pour trouver la plus grande ou la plus petite valeur d'une fonction.
- [29] hademi, G., Mohammadi, H., & Simon, D. (2017). Hybrid invasive weed/biogeography-based optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 64, 213-231.]
- [30] [Ozsoydan, F. B., & Baykasoglu, A. (2021). Chaos and intensification enhanced flower pollination algorithm to solve mechanical design and unconstrained function optimization problems. *Expert systems with applications*, 184, 115496.
- [31] Melkou, L. (2018). Contribution à la Commande Robuste des Systèmes Volants. Théorie et Applications à la Commande d'un Drone [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba].

- [32] ANIS, ELMAHARAT et RAOUF, LEKHDARI. Conception et réalisation d'un mini drone.2021.thèse de doctorat. faculté des sciences technologies.
- [33] C.A. Patel, «Building a Test Bed for mini-Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle with protective Shroud », a thesis submitted to the department of Mechanical Engineering and the faculty of the Graduate School of Wichita State University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of science, July 2006.
- [34] Dahoum, Mehdi abdessamad, and Nabil Moustafa Korichi .Approches De L'intelligence Artificielle Pour La Commande Robuste Des Drones De Type Quadrotor .Diss.Univ Msila, 2021.
- [35] Said kouadri, I. (2014). Etude et conception d'un drone [Mémoire de master, Université de saad dahleb – Blida].
- [36] Sallah, N.,& Babou, O. (2018). Planification de trajectoire pour un véhicule aérien autonome [Mémoire de master, Université de mouloud mammeri – Tizi Ouzou].
- [37] Khebbache, H. (2012). Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires Application : Système UAV de type Quadrirotor [Mémoire de magister, Université de ferhat abbas – Setif].
- [38] A. Tayebi, and S. Mcgilvray “Attitude stabilisation of a four-rotor aerial robot”, Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, December 2004.
- [39] A. Tayebi, and S McGilvray “Attitude stabilisation of a VTOL Quadrotor Aircraft”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 14, No. 3, pp. 562-571, May 2006
- [40]SATLA, Z. (2018). Contribution à la modélisation et à la commande d'un drone miniature [Thèse de doctorat, Université de Djillali Liabès – Sidi Bel Abbès].
- [41] L. Gautier, B. Hamilton, J. Hazebrouck, and T. Tournette “Pilotage d'un quadri-rotor via un FPGA”, Tuteur ESIEE engineering, Journées pédagogiques, 2008.
- [42] Ammari, S. (2017). Simulation et commande d'un drone (quadrirotor) en utilisant simulink.
- [43] Mohamed, A., & Naserddine, O. (2020). Etude et réalisation d'un drone quadrirotor.
- [44] Charland-Arcand, G. (2014).contrôle non linéaire par backstepping d'un hélicoptère de type quadrotor pour des applications autonomes (Doctoral dissertations, Ecole de technologie supérieure).
- [45] NASSIM,Sadallah et OUAHIBA,Babou.Planification de trajectoires pour un véhicule aérien autonome.2018.Thèse de Doctorat .Université Mouloud Mammeri.
- [46] J. Ahuactzin, «Le fil d'Ariane : Une méthode de planification générale,» PhD Thesis, INP, Grenoble, 1994
- [47]B. Loubna, «Planification de trajectoire d'un robot basée sur les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques,» université des sciences et de technologie d'Oran, 2010.
- [48] X. Liang, G. Meng, Y. Xu and H. Luo, “A geometrical path planning method for unmanned aerial vehicle in,” Intelligent Service Robotics, pp. 1-12, 2018.
- [49] C. Yin, Z. Xiao, X. Cao, X. Xi, P. Yang and D. Wu, “Offline and online search: Uav multiobjective path planning under dynamic urban environment,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 2, pp. 546-558, 2018.

[50] Sedini, C., & Cherigui, N. (2019). Conception et commande d'un quadrotor UAV à base d'Arduino [Mémoire de master, Université de Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen]. Thèse.Algérie.

[51] : BOUCHOUK,Maroua. Commande et planification de trajectoire pour un escadron de drone. 2020.Thèse de doctorat . M. Tahour Ahmed

[52] Kennedy, J.; Eberhart, R. (1995). "Particle Swarm Optimization". Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks.IV. pp. 1942–1948.

[53] TENNICHE Nesrine ,HAROUNE Houda Contribution à l'Optimisation Compacte application a la planification de trajectoire de robots volants 2020-2021.

**Résumé :** Les drones, qu'on appelle aussi UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), sont des aéronefs sans pilote capables de faire des tâches difficiles dans des environnements très hostiles, sans aucun risque pour l'humain, d'une façon plus ou moins autonome et automatique.

Ce mémoire aborde l'utilisation de l'intelligence des plantes pour développer une méthode de planification de trajectoire pour un drone.

Nous avons commencé par présenter deux algorithmes inspirés de la nature, il s'agit de FPA et IWO, afin de les utiliser pour étudier la planification de trajectoire en évitant les obstacles, ensuite nous avons traité la modélisation qui consiste à rassembler toutes les méthodes et des techniques permettant de disposer d'une présentation mathématique décrivant le mouvement du système afin de pouvoir établir un modèle dynamique en utilisant le formalisme de Newton-Euler. Puis, nous avons montré une architecture de contrôle basée sur la régulation PID, pour le contrôle des différents mouvements et assurer la stabilisation du drone. Finalement, nous avons fait une étude comparative sur les algorithmes FPA et IWO et PSO.

**Abstract:** Drones, also called UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), are unmanned aircraft capable of doing difficult tasks in very hostile environments, without any risk to humans, in a more or less autonomous and automatic way. This dissertation discusses the use of plant intelligence to develop a trajectory planning method for a drone. We started by presenting two algorithms inspired by nature, these are FPA and IWO, in order to use them to study trajectory planning and obstacles avoidance, then we treated mathematical modeling which consists of gathering all the methods and techniques to have a mathematical presentation describing the movement of the system in order to be able to establish a dynamic model using the Newton-Euler formalism. Then, we showed a control architecture based on PID regulation, for the control of different movements and ensure the stabilization of the drone. Finally, we did a comparative study on the FPA and IWO and PSO algorithms.

## ملخص

الطائرات بدون طيار، هي طائرات قادرة على أداء مهام صعبة في بيئات معادية للغاية، دون أي خطر على البشر، بطريقة مستقلة وتلقائية إلى حد ما.

تتناول هذه الأطروحة استخدام نكاه النبات لتطوير طريقة تخطيط مسار لطائرة بدون طيار بدأنا بتقديم خوارزميتين مستوحاة من الطبيعة، وهما (FPA و IWO)، من أجل استخدامها لدراسة تخطيط المسار مع تجنب العقبات، ثم تعاملنا مع النمذجة التي تتكون من جمع كل الأساليب والتقنيات التي تسمح بالحصول على حساب رياضي عرض تقديمي يصف حركة الدرون من أجل التمكن من إنشاء نموذج ديناميكي باستخدام شكليات Newton-Euler، ثم أظهرنا بنية تحكم تعتمد على تنظيم PID، للتحكم في الحركات المختلفة وضمان استقرار الطائرة بدون طيار. أخيراً، قمنا بإجراء دراسة مقارنة حول الخوارزميات (FPA و IWO و PSO) وفقاً لعدة معايير، سمحنا لاختيار أفضل خوارزمية لتتبع المسار المخطط لطائرة بدون طيار