

I.1 Introduction

L'utilisation des drones a beaucoup évolué durant cette dernière décennie. L'étude de ces systèmes a attiré de nombreux chercheurs travaillant dans des disciplines liées notamment à l'automatique, l'électronique, la mécanique et l'aérodynamique. Différentes configurations des drones multi rotors ont été proposées : en plus (+), croix (x) et avec deux, trois quatre jusqu'à huit hélices. Un drone aérien ou UAV (Unmanned Air Vehicle en anglais) ou plus simplement drone, est un engin volant sans pilote, qui est capable de transporter des caméras, des capteurs des équipements de communication ou d'autres dispositifs. Ils sont utilisés pour réaliser des missions de reconnaissance, de recherche d'informations ou des opérations de combat.

Dans ce mémoire nous nous intéressons par les multi rotors à quatre hélices connus par les quadrirotors, Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord une brève historique sur les quadrirotors, leurs classifications, Ensuite nous présentons les différents domaines d'application de ce véhicule aérien.

I.2 L'histoire des drones

La première génération des quadrirotors est caractérisée par une grande taille et de mauvaises performances dynamiques. Le premier quadrirotor était le Gyroplane n°1 «Breguet-Richet» conçu par les frères scientifiques français Louis et Jaque Breguet en collaboration avec le professeur Charles Richet en 1907 (image I.1) [1]. Un an plus tard, un autre quadrirotor «Gyroplane n°2 » a été construit. Le Gyroplane n°2 est équipé d'un moteur Renault, plus puissant, qui atteignit 55 CV brusquement.

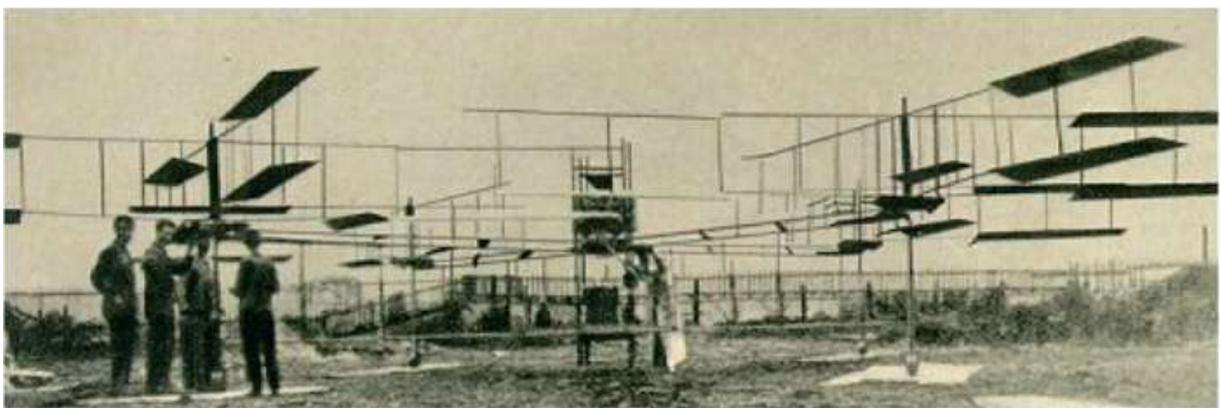


Image I.1. Éguet Richet Gyro1- 1907

En 1920 (image I.2), Etienne Oemichena commença ses expériences dans la conception des aéronefs à voilures tournantes [1]. Six modèles ont été conçus par ce jeune ingénieur de la

compagnie Peugeot. Parmi les quels un grand quadrirotor de 800kg construit en 1922, avec quatre rotors et huit hélices tournées par un seul moteur.

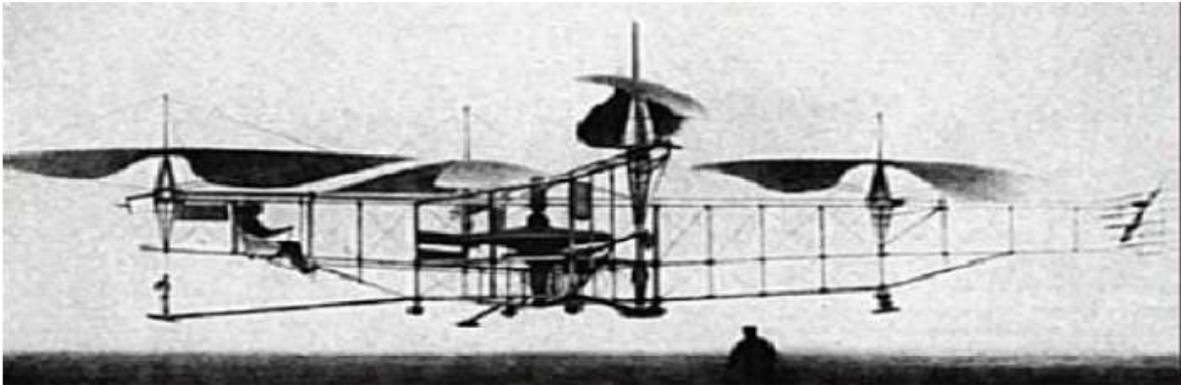


Image I.2. Oemichen 1920

Une autre plateforme à vol vertical été construit pour le service aérien de l'armée américaine à Dayton Ohio en 1921 par les ingénieurs George de Bothezat (image I.3) et Ivan Jérôme. C'était une structure en croix de 1678Kg [1].

Plus de 100 essais de vols ont été exécutés sur ce grand quadrirotor, mais la commande en vol était très difficile et le prototype n'a pas répondu aux exigences d'exécution de l'armée américaine.

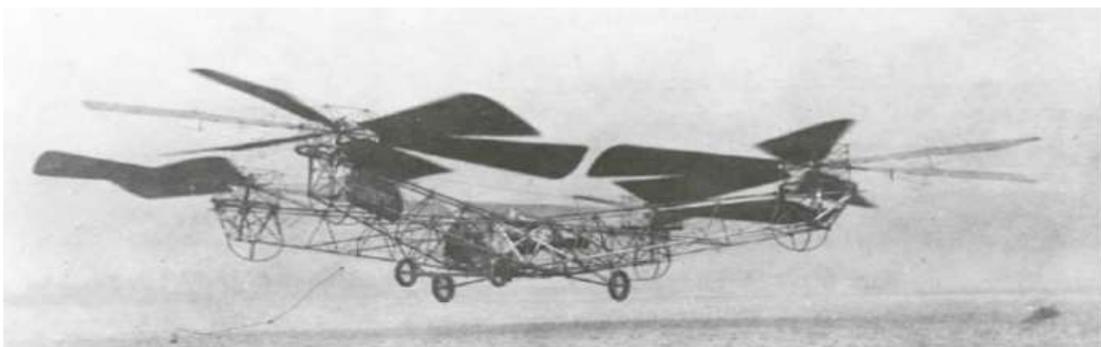


Image I.3. Le Quadrirotor de Bothezat 1922.

Dans les années 50, Amityville (New York), Convertawing sa construit un quadrirotor. Ce véhicule a été commandé en changeant la poussée fournie par chaque rotor [1]. Le quadrirotor de Convertawingsa été piloté avec succès, mais la production a été arrêtée en raison d'un manque d'intérêt commercial pour cet avion. (Image I.4).

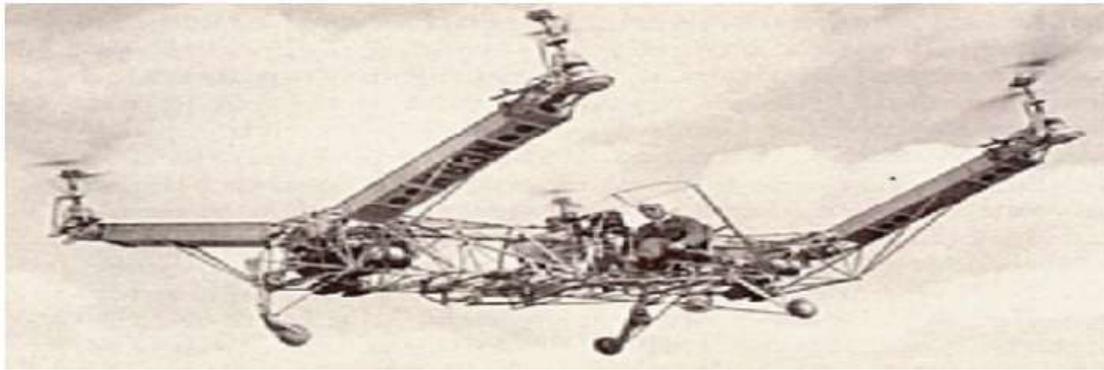
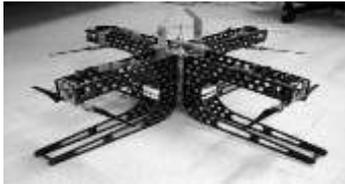


Image I.4. Convertawings Model A 1956

Projets	Université / Ecole	Plateforme
Le Mesicopter (1999-2001)	université de Stanford aux USA	
Le X4-Flyer (2002,2004)	Université National Australienne	
Le x4-flyer	CEA France	
OS4 (2003-2007)	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne en Suisse	
Quentin H4	EITA en France	

<p align="center">Le quadrotor de Pennsylvanie</p>	<p align="center">Pennsylvanie en USA</p>	
<p align="center">Starmac</p>	<p align="center">l'université de Stanford aux USA</p>	

Tableau I.1. Des projets de conception de Quadrotor

I.3 Les applications des drones

I.3.1 Applications militaires

Les lourdes pertes subies pendant la seconde guerre mondiale par les aviations d'observation de chacun des antagonistes suscitérent l'idée d'un engin d'observation militaire sans équipage (ni pilote, ni observateur). Pendant la guerre du Vietnam, les Américains ont utilisé des drones (Firebee) pour localiser les rampes de lancement des missiles sol-air soviétiques «SAM-2».

Lors de la guerre du Golfe, les britanniques, les français commencèrent à se servir de drones et les américains l'ont fait appel au drone (Pioneer) pour la surveillance jour/nuit l'acquisition des objectifs, et les réglages de l'artillerie.

De leur côté, les Israéliens ont saturé les défenses aériennes le long du canal de Suez lors de la guerre du Kippour (1973) et ce, avec un grand nombre de drones bon marché.

Mais c'est surtout au cours des trois derniers conflits majeurs impliquant les forces internationales de l'OTAN (intervention au Kosovo, en Afghanistan et en Irak) que les drones ont vraiment pu démontrer leurs capacités opérationnelles, accomplissant indifféremment des missions d'observation aérienne ou d'attaque au sol. En règle générale, on peut décomposer en trois grandes catégories, les missions militaires confiées aux drones :

- la surveillance et le renseignement.
- le support au combat.
- le combat proprement dit.



Image I.5. Des applications militaires des drones



Image I.6. Surveillance de la Maison Blanche

I.3.2 Applications civiles

Tous les avantages reconnus des drones pour les applications militaires sont transposables aux applications civiles. On peut citer :

a. Études scientifiques et surveillance des systèmes distribués

En novembre 2013, pour la première fois une société française, fait décoller un drone pour inspecter le viaduc ferroviaire, sur la ligne TGV Paris-Marseille [2]. Il a suffi de quelques images haute définition pour détecter d'éventuelles microfissures, Repérage des vols de câbles, contrôle des caténaires, détection d'obstacles sur la voie, le drone peut remplir bien des missions de surveillance sur ces longs réseaux (image I.7).



Image I.7. Réseaux surveillés

b. Recherche et sauvetage

Les quadrirotors peuvent éventuellement devenir les gardes du corps du futur [2]. Le laboratoire RTS (une société de recherches iranienne) a commencé le développement d'un quadrirotor géant, Ce robot peut aider les gardes du corps à sauver des vies en temps record et de limiter la marge de risque des intervenants (image I.8).



Image I.8. Sauvetage des personnes

c. Missions dangereuses (détection de gaz toxiques, radiations)

Là où l'homme ne peut se rendre sans mettre en péril sa santé, le drone peut le remplacer. Un drone a été envoyé par l'agence internationale de l'énergie atomique pour cartographier les poches de radioactivité résiduelle autour de la centrale de Fukushima [2], Ce drone a réussi à accéder aux zones dangereuses pour analyser les dégâts causés par le tsunami. Ce véhicule est idéal pour le déplacement dans les environnements hostiles ou à accès difficile à savoir les cheminées d'usines, etc...(Image I.9).



Image I.9. Détection de gaz et radiations

d. La livraison des colis

La livraison des médicaments d'urgence ou des colis achetés sur net sont des applications possibles [2]. La livraison des colis par les drones est d'un intérêt énorme pour les citoyens habitant dans des endroits isolés. Les drones peuvent montrer une grande efficacité dans les opérations de distribution des médicaments ou de la nourriture durant les catastrophes naturelles (les tremblements de terre, inondations, avalanches ou incendies) (image I.10).



Image I.10. Livraison des colis

I.4 Classification des drones

Il n'existe pas une façon unique pour classer les drones, ils peuvent être répartis selon plusieurs critères : autonomie, portée, altitude, mission, systèmes de contrôles...etc.

I.4.1 Classification selon la taille

Les drones sont classiquement répartis selon leurs taille (ou leurs capacité d'emport, ce qui est sensiblement équivalent). On distingue ainsi les drones HALE, MALE, les micro drones et les mini drones. Ces catégories sont résumées ci-après :

- **HALE** (Haute Altitude Longue Endurance) : Ce sont des drones de grande taille, le plus souvent à voilure fixe. Ils sont capables de rester très longtemps en vol et de collecter des informations sur de très longues périodes (entre 12 et 48 heures).
- **MALE** (moyenne Altitude Longue Endurance) : sont utilisés pour des vols de longue durée à une moyenne altitude opérationnelle, ayant une grande autonomie. Ces deux types de drones font partie de la classe de grande taille. Ils peuvent embarquer

des armes, ce qui nécessite généralement d'avoir un humain dans la boucle, ce dernier doit garder la décision de tir et pouvoir à tout moment annuler la mission.

- **Micro drones** : Ceux sont des drones ayant des tailles variant du centimètre à quelques dizaines de centimètres. Généralement propulsés électriquement. Ainsi, ils permettent de faire des vols à l'intérieur. Elles se caractérisent par une faible charge.
- **Mini drones** : Ce sont des drones plutôt légers et de taille réduite (jusqu'à quelques kilogrammes et d'une envergure jusqu'à 1 à 2 mètre) facilitant la mise en œuvre d'une autonomie relativement faible (de 10 à 30 minutes) et généralement utilisés pour l'observation de zones difficiles d'accès.

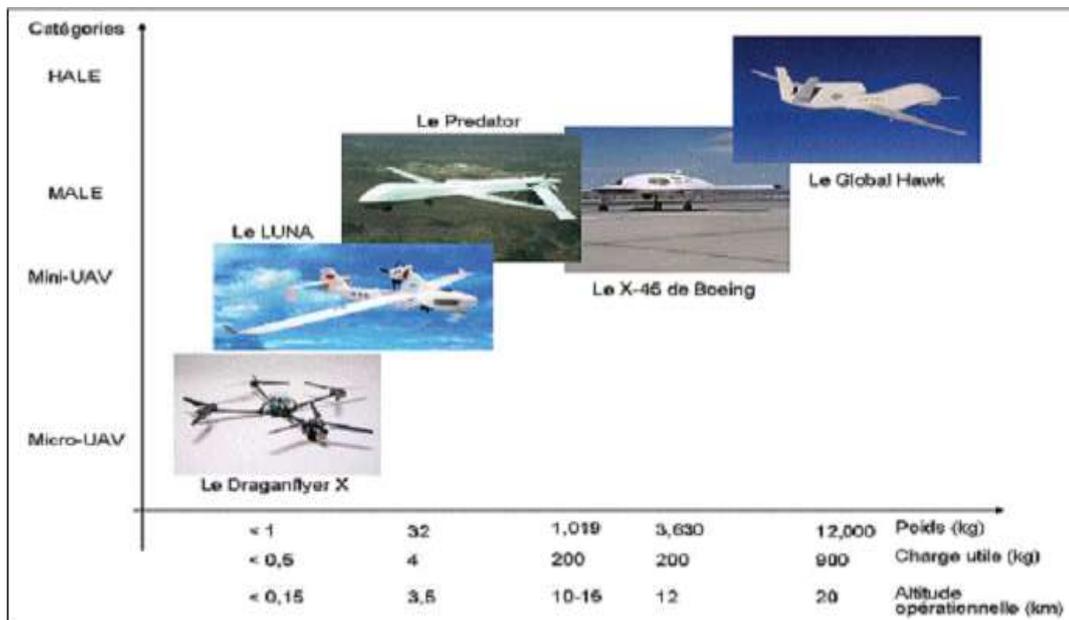


Figure I.1. Les Catégories des drones

Ces différentes classes correspondent naturellement à différentes applications.

I.4.2 Classification selon le mode de propulsion

Le fonctionnement aérodynamique fournit une autre possibilité de classification. Ainsi, les drones peuvent être structurés principalement en trois familles :

- **drones à Voilures fixes** : sont des drones utilisant les ailes fixes dans leur mode déplacement. Qui sont soit :
 - ✓ Plus lourd que l'air : type avion.
 - ✓ Plus léger que l'air : type Dirigeable.
- **drones à ailes battantes** : de type oiseau ou insecte.

- **drones à voilures tournantes** : Une étude bibliographique montre que la recherche en robotique aérienne s'est principalement focalisée sur ce type qui présente les avantages suivants [3] :
 - ✓ Un décollage et atterrissage vertical.
 - ✓ Sont capables d'effectuer un vol stationnaire à basse vitesse et à faible altitude.



Image I.11. Classification des drones selon le mode de propulsion.

Les drones à voilure tournante se subdivisent, quant à eux, en 6 sous-classes, donc nous pouvons classer selon le nombre d'hélices comme suit :

- **Les Mono-rotor** : Ils sont caractérisés par l'utilisation d'un seul rotor comme actionneur principal. Dans cette catégorie, nous trouvons essentiellement les convertibles.



Image I.12. Avion 3D

- **Les birotors** : Il existe plusieurs types de configurations à deux rotors tels que l'hélicoptère classique composé d'un rotor principal et d'un rotor en queue. Les appareils sans plateaux cycliques (autre que les hélicoptères notamment) utilisent des ailerons pour faire pivoter les rotors. Il existe aussi des appareils possédant deux rotors sur le même axe tournant dans des sens opposés et des ailerons qui baignent dans le flux d'air de ces rotors (image I.13).

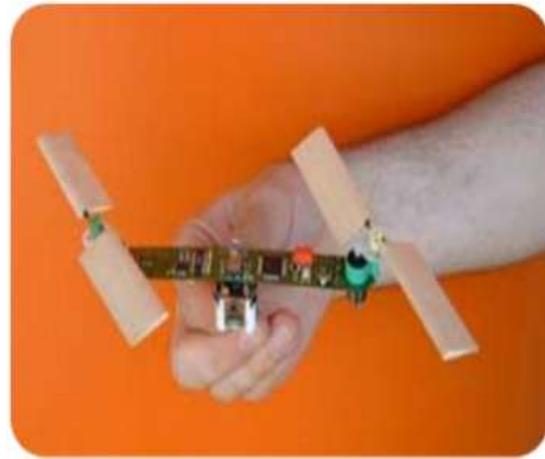


Image I.13. Le T-Wing et l'HoverEye

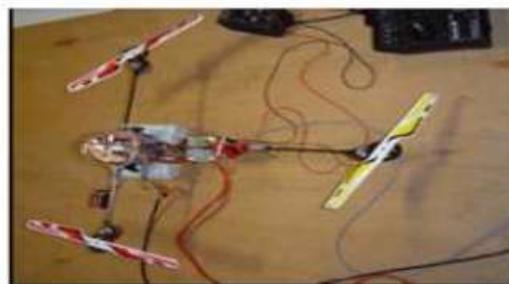
- **Les tris rotor** : Moins performant en vol que le Quadrotor, le tri-rotor (image I.14) est constitué de deux rotors à l'avant qui tournent dans des sens opposés pour modifier le tangage et d'un rotor en arrière pour régler le roulis.



(a)



(b)



(c)

Image I.14. Le Hélicoptères à trois hélices. Vectron (a), l'hélicoptère auto-stable (b) et le Tri-rotor de Compiègne (c).

- **Les Quadrotors** : Un Quadrotor est un engin volant doté de quatre rotors placés aux extrémités d'une armature en croix (image I.15). Ces quatre rotors lui fournissent la force verticale (portance) qui lui permet de décoller.

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. Ses mouvements

possibles sont le Gaz (montée ou descente verticale), le Roulis ou Tangage qui est une orientation que prend le Quadrotor, et le Lacet qui est une rotation du Quadrotor autour de lui-même [4].



(a)



(b)



(c)



(d)

Image I.15. Hélicoptères à quatre hélices: Quadrotor de pennsylvanie (a), X19 quadtilt-rotor aircraft (b), le drone du laboratoire IBISC (c) et le drone de la NASA (d).

➤ Hexa rotor

Un Hexa rotor est un engin volant doté de Hexa rotors.



Image I.16. Exemple de hexa rotor.

➤ Octorotor

Un octorotor est un engin volant doté d'octorotors



Image I.17. Exemple d'octorotor.

I.5 Les différentes stratégies de commande utilisée dans la recherche bibliographique

Par le temps, les chercheurs et les universités dans le monde sont développés les techniques de commande des Quadrirotor, et montreront que la configuration du Quadrirotor est meilleure que d'autres configurations d'hélicoptère pour les applications UAV.

Plusieurs architectures et techniques de contrôle ont été développées sur cette plateforme et un simple contrôleur PD peut lui fournir une stabilité suffisante [5].

- 1. Commande utilisant le théorème de Lyapunov :** Cette technique de commande permet de démontrer que le Quadrirotor est asymptotiquement stable sous certaines conditions ([6], [7], [8]).
- 2. Le contrôleur PID :** cette commande classique n'a aucune exigence sur les paramètres du modèle commandé et elle est très simple à mettre en œuvre [9].
- 3. Le contrôleur PD :** la puissance de ce contrôleur réside dans sa propriété de la convergence exponentielle, essentiellement due à la compensation des moments de Coriolis et des moments gyroscopiques [10].
- 4. La commande adaptative :** les techniques de commande adaptative offrent de bonnes performances, notamment avec les dynamiques non modélisables et l'incertitude des paramètres. [11]
- 5. La commande LQR :** cette loi de commande a donné de bons résultats dans la stabilisation d'attitude du Quadrirotor OS4 dans les travaux de S .Bouabdallah et André Noth. Ces résultats ont été comparés avec ceux obtenus par le contrôleur PID [9].

6. **L'approche Backstepping** : de meilleurs résultats ont été obtenus avec cette technique de commande non linéaire, la convergence des états internes du Quadrirotor a été garantie quel que soit les états initiaux. Cette technique de commande a été renforcée par la suite dans les travaux de [6] par l'ajout de l'action intégrale. Cette approche a été validée sur OS4 dans diverses expériences de vol.
7. **La commande « Dynamic Feedback »** : cette technique a été appliquée dans quelques projets sur le Quadrirotor, l'objectif est de transformer le système en boucle fermée en sous-systèmes linéaires, contrôlables et découplés [11], [12].
8. **La Commande par Vision** : cette technique est basée sur la commande visuelle utilisant soit une caméra miniature embarquée à bord du Quadrirotor, ou une caméra externe [13].

D'autres techniques de commande ont été implémentées pour la commande des Quadrirotor parmi lesquelles on peut citer : mode glissant, Feedback Linéarisation, la logique floue, les réseaux de neurones [14], et aussi des méthodes d'hybridation entre deux commandes et l'apprentissage par renforcement dans la stabilisation et la navigation du Quadrirotor [11].

I.6 Les avantages de stratégie de commande proposée

La commande par mode glissant présente les caractéristiques suivantes :

- Sa relative simplicité d'implémentation.
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques et des perturbations.
- La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge, et perturbations.
- Le choix de la surface de commutation est assez libre.
- La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les robots volants autonomes, nous avons commencé par un bref historique sur l'avion sans pilote, nous avons donné les applications des UAV dans le domaine industriel applications militaires, applications civiles, nous avons parlé sur les classifications des drones en général, les différentes stratégies de commande utilisées, ainsi que les avantages de commande proposés.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter la description et la modélisation d'un système UAV de type quadrirotor.