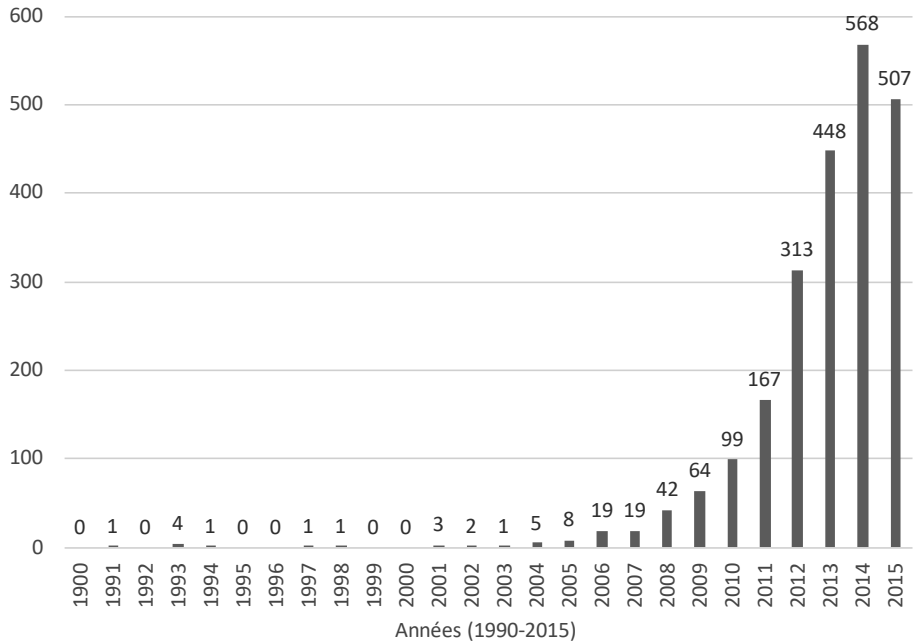


# Chapitre 1

## La robotique aérienne : un petit tour d’horizon

### 1.1 Introduction

Les robots aériens ou drones (Remotely Piloted Aircraft Systems, en anglais *RPAS*) sont des engins volants sans pilote, capables de mener à bien une mission de façon plus ou moins autonome. Contrairement aux activités d’aéromodélisme, leur fonction principale est de réaliser une tâche « répétitive, sale ou dangereuse » (*Dull, Dirty, Dangerous*) de façon plus sûre ou plus efficace qu’un engin piloté à distance. La possibilité d’utiliser des systèmes autonomes tels que les drones aériens dans le secteur civil a été depuis quelques années largement testée grâce à de nombreux projets de recherche, certains financés par la Commission européenne, qui ont permis d’étudier des concepts d’application potentielle des drones comme vecteur expérimental. Ainsi des chercheurs aux États-Unis ont utilisé des flottes de drones pendant la dernière décennie pour aborder les questions du bilan énergétique de la Terre, la recherche polaire et les émissions volcaniques grâce à de nombreuses mesures réparties spatialement, mais synchronisées temporellement, ce qu’aucune technologie ne pouvait faire simplement. En Europe, les programmes drones dans la recherche atmosphérique ont été développés dans plusieurs pays, notamment en Norvège et en Allemagne. Plus proches de l’industrie, les drones se sont surtout développés dans l’inspection de bâtiments et la surveillance d’infrastructures (pipeline, ligne électrique, ligne de chemin de fer). Le monde académique a lui aussi largement contribué à l’émergence des mini-drones à travers les nombreux développements méthodologiques en automatique, aérodynamique et vision. En juin 2015, le magazine *Nature* a consacré une édition spéciale aux machines intelligentes avec un article sur « la science, la technologie et l’avenir des petits drones autonomes » ainsi qu’aux tendances futures en matière de recherche dans le domaine des petits drones. Les données recueillies entre 1990 et 2015 sur les sites internet « Engineering Village » et « Web of Science » (voir Figure 1.1) permettent de constater que le nombre de publications n’a eu de cesse d’augmenter depuis 2006, créant avec elles des bases solides pour le développement des drones actuels.

FIGURE 1.1: *Production scientifique sur les drones sur la période 1990-2015*

## 1.2 Une brève histoire des drones

C'est en 1907 en France que les frères Breguet, aidés par Charles Richet, font décoller pour la première fois un quadrirotor. Pour ce vol historique, le gyroplane Breguet-Richet No. 1 s'élève à 60 centimètres au dessus du sol et est maintenu par quatre hommes. C'est l'Américain d'origine russe George de Bothezat qui fut le premier à faire voler un quadrirotor de manière complètement autonome en 1922. En 1923, le quadrirotor construit par le Français Étienne Œhmichen réussit un vol stationnaire de cinq minutes. En 1918, Georges Clemenceau, président de la Commission sénatoriale de l'Armée, initie un projet *d'avion sans pilote* et la même année un Voisin BN3 réussit à voler sur 100 kilomètres en circuit fermé grâce à un système de pilotage automatique imaginé par le capitaine Max Boucher. Le terme *drone*, qui signifie faux bourdon en anglais, a été popularisé dans les années 1930 par la Royal Air Force (RAF) pour désigner une cible volante radiocommandée utilisée pour l'entraînement des pilotes de chasse. Cet avion cible, issu du De Havilland DH.82 Queen Bee (reine des abeilles), avait un vol lent, bruyant et éphémère qui faisait plus penser au destin d'un bourdon qu'à celui d'une abeille. Ce terme fut repris par l'armée américaine à partir de 1941. En 1957, l'armée américaine passe un contrat avec le constructeur Curtiss-Wright pour développer un projet de jeep volante. Deux prototypes de VZ-7, aussi surnommé *Flying Truck* (camion volant), furent livrés en 1958 mais ne parvinrent pas à atteindre les objectifs de vitesse et d'altitude fixés par l'armée. Jusqu'à dans les années 1990, les drones sont des aéronefs

certes sans pilote mais de taille semblable à celle de leur homologue embarquant un pilote. De plus leur vocation est avant tout militaire [1].

Il faut attendre les années 1990, avec le développement des microsystèmes électromécaniques (en anglais *MEMS* pour *Micro-Electro-Mechanical Systems*) et des microordinateurs monopuce (en anglais *SCM* pour *Single Chip Microcomputer*) pour que la situation change radicalement. Notons que c'est en 1991 que France Télécom commercialise le Bi-Bop, premier téléphone portable en France. Parallèlement au développement de la téléphonie mobile, l'essor des centrales inertielle (en anglais *IMU* pour *Inertial Measurement Unit*) miniatures, des microcontrôleurs et des processeurs de traitement numérique du signal (en anglais *DSP* pour *Digital Signal Processor*) vont permettre une démocratisation des drones, aussi bien au niveau des dimensions que du prix, et un accroissement des missions envisageables. Ces avancées technologiques capitales expliquent l'expansion actuelle du marché des drones, et plus particulièrement des mini-drones.

### 1.3 L'essor des drones dans le secteur civil

Aujourd'hui, une pénétration plus importante des drones dans la sphère de l'aviation civile est attendue avec de nouveaux projets de recherche permettant d'étudier des idées d'application potentielle des drones, notamment pour le transport aérien.

Au cœur de la mobilité urbaine aérienne du futur, aussi appelée *UAM* pour *Urban Air Mobility*, les mini-drones seront dans quelques années des acteurs cruciaux des futurs services de transport en milieu urbain comme l'anticipe la Commission européenne. L'espace aérien de basse altitude permettra un ensemble de services, appelés « U-space », reposant sur l'automatisation des procédures pour garantir une intégration sûre et robuste des drones dans l'espace aérien jusqu'à l'intégration finale vers 2030<sup>1</sup>.

Parmi ces services, nous pouvons citer entre autres la livraison de sang ou le soutien médical sur des lieux d'accident pour les professionnels de la santé, ainsi que la livraison d'organes ou d'échantillons entre les hôpitaux. Ces services reposeront sur l'utilisation de drones avec un niveau d'autonomie élevé qui permettra à l'engin d'avoir la capacité d'atterrir et de décoller verticalement mais aussi de faire une transition vers un vol de longue durée, à très haute vitesse sans qu'aucune reprise à distance ne soit possible en cas du dépassement de l'enveloppe de vol. Ces engins devront avoir des capacités décisionnelles suffisantes qui leur permettront de prendre en charge des tâches de pilotage et de guidage pour lesquelles l'intervention humaine est faillible voire inefficace afin de leur permettre une insertion sûre et robuste dans l'espace aérien. Ce sujet est d'un intérêt certain pour les industriels qui souhaitent sécuriser le vol de leurs drones d'une valeur de plusieurs dizaines de milliers d'euros, mais aussi pour la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile) qui doit assurer la sécurité des populations lors de la mise en œuvre de nouveaux concepts d'opération comme les missions en zone urbaine. Les ingénieurs et les chercheurs doivent pour cela travailler au développement d'une chaîne avionique multi-disciplinaire qui conférera à l'engin un degré d'autonomie et des qualités de vol en boucle fermée en adéquation avec la ou les missions qu'il doit remplir.

---

1. [www.sesarju.eu](http://www.sesarju.eu)

De façon très concrète, ce système avionique peut se décomposer en une partie aérodynamique intégrant un ensemble d'études en soufflerie et en vol permettant la modélisation totale ou partielle du drone, une partie matérielle (en anglais *hardware*), comprenant un ordinateur embarqué, des capteurs, un ensemble d'actionneurs et un module de communication sol/bord, et une partie logicielle (en anglais *software*) qui regroupe :

- ▶ des algorithmes de traitement du signal qui assurent des fonctions aussi diverses que le débruitage des sorties des capteurs ou l'estimation et la reconstruction des états du drone ou d'autres paramètres de vol, à partir d'une fusion des données mesurées disponibles à bord (et souvent peu redondées), corroborées par les sorties d'un modèle mathématique de prédiction, descriptif du comportement dynamique de l'engin ;
- ▶ des algorithmes de contrôle « bas-niveau » pour le pilotage et le guidage de l'appareil en boucle fermée de sorte que celui-ci soit commandé en consigne à atteindre ;
- ▶ enfin, des algorithmes de contrôle « haut-niveau » pour la navigation, la replanification ou l'aide à la décision (IA) en l'absence d'un opérateur humain ou dans le cas de situations dégradées (rupture de COM, pannes, ...).

Les algorithmes d'estimation, d'état ou de paramètres, et de contrôle apparaissent donc primordiaux, d'autant plus lorsque la technologie des capteurs et des actionneurs, pour des raisons de coût et d'encombrement essentiellement, ne permet pas de disposer de capacités illimitées. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des mini-drones.

## 1.4 Les plateformes expérimentales

Depuis 2006, l'augmentation du nombre d'appareils touche principalement les mini- et les micro-drones qui se classent dans la catégorie des moins de  $30\text{ kg}$ <sup>1</sup>. Les mini-drones aériens sont les engins auxquels nous nous focaliserons dans ce livre. C'est le type d'engin qui se prête le mieux au développement de plateformes expérimentales, relativement faciles à mettre en œuvre et peu onéreuses. Entre autre, ils servent à mettre en pratique et à illustrer des travaux de recherche dans les domaines de la robotique, de l'automatique ou du traitement du signal. La Figure 1.2 présente un bref aperçu de ce qui peut être aujourd'hui conçu en termes de miniaturisation des véhicules aériens, à savoir le drone du projet Remanta<sup>2</sup> et un drone de type *MFI* (Micromechanical Flying Insect) de Metafly<sup>3</sup>.

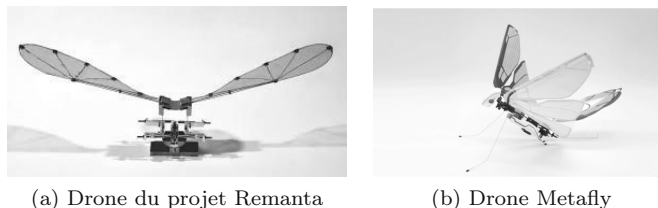


FIGURE 1.2: *Exemples de micro drones*

2. <https://www.onera.fr/fr/actualites/le-drone-du-futur-copie-la-nature>

3. <https://www.kickstarter.com>

Les configurations imaginables pour les drones sont très nombreuses, comme l'illustre la Figure 1.3. Ces engins partagent cependant plusieurs caractéristiques communes : des masses à vide et au décollage, ainsi qu'un poids et une taille limites propres à leur catégorie. La donnée de ces caractéristiques conditionne fortement le nombre et la performance des capteurs qu'il est possible d'embarquer ; en conséquence, ce sont un niveau d'autonomie et une portée seuils qui orientent l'utilisation du drone vers telle ou telle application.

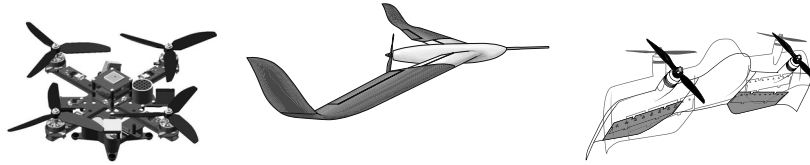


FIGURE 1.3: *Différentes configurations de drones (quadrirotor, voilure fixe, convertible)*

Détaillons brièvement les avantages et les inconvénients des différentes configurations de drones que nous pouvons retrouver dans la littérature.

Les drones à rotors multiples ou voilures tournantes sont particulièrement bien adaptés aux vols stationnaires de quelques dizaines de minutes et à basse vitesse. En revanche, ce type d'engin n'est pas du tout optimisé pour effectuer des vols de longue durée et n'est pas recommandé non plus pour des vols en translation à haute vitesse. Les drones à voilure fixes (voir Figure 1.4a) quant à eux, permettent d'accomplir principalement des missions d'observation. En effet, grâce à ce type de cellules énergétiquement plus efficaces que celles à voilure tournante, il est possible d'obtenir des durées de vol allant au-delà de l'heure. Malheureusement, ils sont difficiles à opérer et la dégradation des performances en termes d'endurance va de pair avec une réduction de la dimension de la cellule.

Enfin, très peu connus à ce jour, les drones convertibles proposent la possibilité de combiner le vol stationnaire ou à très basse vitesse avec le vol en translation. En pratique, la conception de tels engins se révèle d'un point de vue de la commande et de l'identification complexe car la phase de transition entre le mode hélicoptère et le mode avion s'avère une phase critique dont les effets aérodynamiques sont encore méconnus.

Le choix de la configuration d'un drone et des tests en situations réelles apparaissent donc primordiaux avant la réalisation de toute mission. Pour les essais en vol, on utilise des équipements spécifiques et dédiés : on parle de « volière » de drones, comme illustré sur les Figures 1.4 et 1.5. Ce sont des volumes importants (typiquement de 500 à 1000  $m^3$ ), sécurisés, et équipés d'instruments de localisation et de mesure de haute qualité.

## 1.5 Les projets dits « open-source »

De nombreux acteurs issus du monde académique (laboratoires de recherche, universités, institutions, etc.) ont fortement contribué à l'essor de la robotique aérienne grâce à la conception d'engins innovants, notamment de mini-drones.

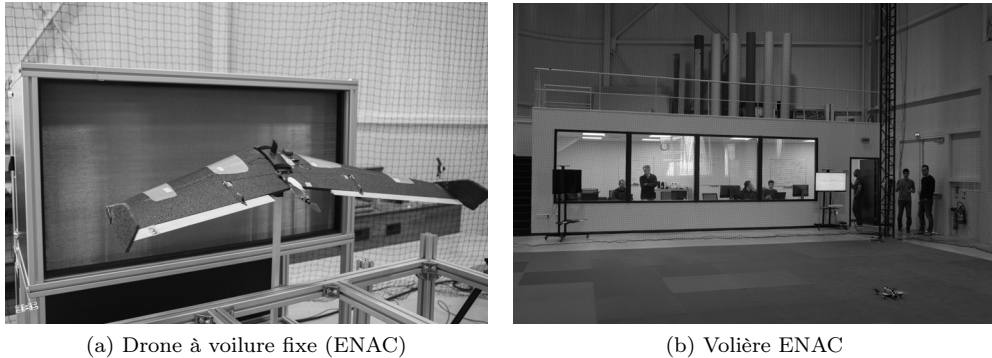


FIGURE 1.4: Vues de la volière de l'ENAC

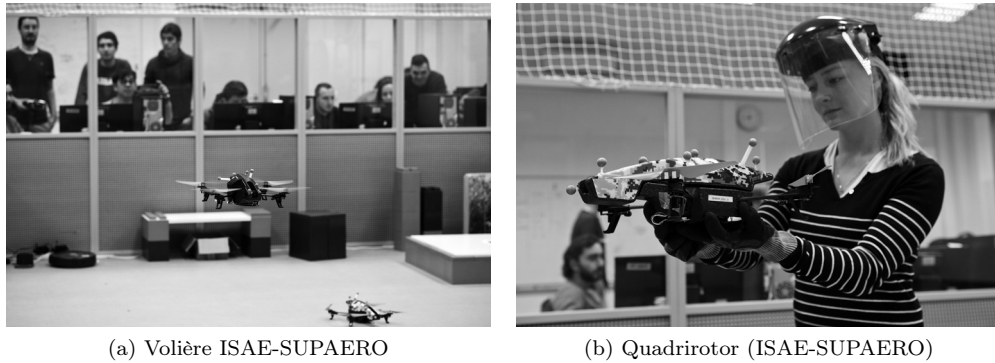


FIGURE 1.5: Vues de la volière de l'ISAE-SUPAERO (©Aude Lemarchand)

Parmi tant d'autres acteurs, nous pouvons citer l'ETH Zurich et son projet PIX-HAWK qui traite de la vision pour des robots aériens autonomes ; l'université de Stanford/Berkeley et sa plateforme *STARMAC* (*Stanford/Berkeley Testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi-Agent Control*) grâce à laquelle de nouveaux concepts en termes de contrôle et de planification multi-agents ont pu être mis au point ; la société allemande Ascending Technologies qui commercialise plusieurs types de mini-drones entièrement équipés ainsi que des cartes électroniques de pilotes automatiques pré-programmés et fournis avec des outils de développement ; et la société française Parrot qui a commercialisé de nombreuses versions de drones grand public tel que l'ARDRONE-2, le Bebop ou encore l'Anafi.

L'impressionnant essor de la robotique aérienne depuis les années 2010 a également entraîné avec lui un certain nombre de projets dits « open source » ou libres (voir Table 1.1 [2]) qui se sont nourris de la passion d'individus issus de tous bords : chercheurs, universitaires, aéromodélistes, électroniciens, informaticiens, etc.

Projet « open source »	Site web
Ardupilot	<a href="http://ardupilot.com">http://ardupilot.com</a>
Librepilot	<a href="http://www.librepilot.org/site/index.html">http://www.librepilot.org/site/index.html</a>
Paparazzi	<a href="http://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main_Page">http://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main_Page</a>
Pixhawk	<a href="https://pixhawk.org/">https://pixhawk.org/</a>
Betaflight	<a href="https://betaflight.com/">https://betaflight.com/</a>
KKmulticopter	<a href="http://www.kkmulticopter.kr">http://www.kkmulticopter.kr</a>
Cleanflight	<a href="http://cleanflight.com">http://cleanflight.com</a>
Aeroquad	<a href="http://www.aeroquadstore.com">http://www.aeroquadstore.com</a>
Crazyflie	<a href="http://www.bitcraze.io/category/crazyflie">http://www.bitcraze.io/category/crazyflie</a>
CrazePony	<a href="http://www.crazepony.com">http://www.crazepony.com</a>
Autoquad	<a href="http://autoquad.org">http://autoquad.org</a>
MegaPirate	<a href="http://megapiratex.com/index.php">http://megapiratex.com/index.php</a>
Taulabs	<a href="https://github.com/TauLabs/TauLabs/wiki">https://github.com/TauLabs/TauLabs/wiki</a>
Dronocode	<a href="http://www.dronocode.org">http://www.dronocode.org</a>
Parrot API	<a href="https://developer.parrot.com">https://developer.parrot.com</a>
3DR Dronekit	<a href="http://www.dronekit.io">http://www.dronekit.io</a>
DJI Developer	<a href="https://developer.dji.com">https://developer.dji.com</a>
DJI Matrice 100	<a href="https://www.dji.com/fr/matrice100/info">https://www.dji.com/fr/matrice100/info</a>
Ehang GHOST	<a href="http://dev.ehang.com">http://dev.ehang.com</a>

TABLE 1.1: Les projets « open-source » majeurs

Par exemple, le système libre appelé *Paparazzi*<sup>4</sup> [3] propose un système complet de pilote automatique pour mini-drones et s'inscrit dans cette logique. Celui-ci repose sur une communauté où chaque développeur met à la disposition de tous chacune des avancées ou contributions méthodologiques, technologiques ou logicielles. Chaque apport à la communauté peut ainsi être évalué par le retour d'expérience de centaines d'autres utilisateurs à travers le monde.

De très nombreux projets se sont structurés selon ce mode d'organisation, le plus célèbre d'entre eux étant très certainement le système d'exploitation Linux. Dans le domaine de la robotique, environ 2000 projets ont adopté ce mode de fonctionnement à ce jour. Des alternatives à *Paparazzi* existent, citons entre autres : LibrePilot, Ardupilot, Pixhawk de l'ETH-Zurich, KKmulticopter de HiSystems GmbH pour la partie logicielle et Betaflight, Dronocode et Parrot API par ailleurs.

## 1.6 Les architectures d'estimation et de contrôle

L'architecture dite de « haut niveau » mise en place au sein des autopilotes se caractérise par plusieurs boucles. Nous pouvons distinguer les boucles de navigation, guidage et stabilisation. Ces dernières forment les modes de base (cf. Figure 1.6) ou aussi appelés modes de contrôle.

---

4. [www.paparazzi-uav.org](http://www.paparazzi-uav.org)

Le plan de vol est défini à partir d'une description des tâches de l'engin en points de passage qui viendront nourrir les blocs de navigation et de guidage afin de réaliser un suivi de trajectoire en fonction des états courant du système tel que la position, l'altitude et le cap. Enfin, les différents moyens de mesure viendront alimenter une boucle d'acquisition des données, suivie d'une étape d'estimation de l'état du système afin de fournir au bloc de commande les informations nécessaires qui permettront à l'aéronef de respecter le plan de vol défini par l'utilisateur.

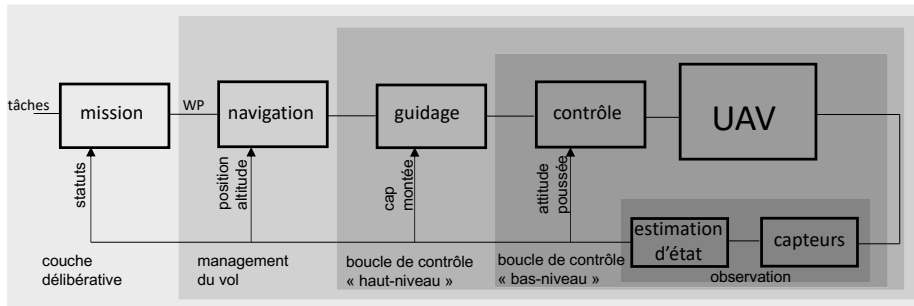


FIGURE 1.6: Hiérarchie « haut-niveau » des boucles de contrôle dans un autopilote

Concernant les modes de contrôle, ils sont définis par la capacité du mini-drone à maintenir une position, une attitude ou un cap à l'aide de ses capteurs. Parmi les nombreuses configurations de correcteurs, la structure PID est utilisée dans la majorité des projets. Le chapitre 5 nous permettra d'étudier plus en détail les avantages et les inconvénients des différentes structures couramment utilisées dans la littérature. La plupart des projets de développement de mini-drones, qu'ils soient de nature privée ou académique, utilisent des algorithmes d'estimation d'état relativement génériques appelés *Attitude and Heading Reference System (AHRS)* ou *Inertial Navigation System (INS)* suivant que seule l'attitude et éventuellement, la position et la vitesse de l'aéronef est/sont estimée/s. Comme nous le verrons au cours du dernier chapitre, l'état de l'art nous apprend que de très nombreuses méthodes peuvent être employées afin d'estimer ces variables essentielles pour la restitution de l'état du mini-drone. Le contrôle basé capteurs nécessite de caractériser les imperfections des différents moyens de mesure embarqués afin de choisir un filtrage performant.