

# Les mini drones pour la sécurité

Jean-Marc ALEXANDRE<sup>1</sup>, Laurent ECK<sup>1</sup>, Nicolas GUENARD<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEA List, Service Robotique et Interaction, BP6, 92265 Fontenay aux Roses Cedex

[jean-marc.alexandre@cea.fr](mailto:jean-marc.alexandre@cea.fr), [laurent.eck@cea.fr](mailto:laurent.eck@cea.fr), [nicolas.guenard@cea.fr](mailto:nicolas.guenard@cea.fr)

**Résumé** – Les mini drones à voilure tournante suscitent depuis quelques années un vif intérêt pour des applications dans le domaine de la sécurité civile. A titre d'exemple de nombreuses applications potentielles existent comme la surveillance de site critique, l'intervention post accidentelle ou la surveillance de foules (manifestation, combat de rue ...). Cet article permet de faire un point sur cette nouvelle technologie de petit robot volant. Il débute par un état de l'art industriel et académique et présente quelques applications. L'analyse de scénarios type permet de dégager les fonctions principales attendues en terme de contrôle commande, autonomie et communication. La deuxième partie de l'article présente les solutions technologiques (essentiellement au niveau contrôle commande) développées ou à développer pour permettre l'utilisation à grande échelle de ces mini drones à voilure tournante. Il ressort que pour des difficultés de communication vidéo entre le poste sol et le drone et pour simplifier la tâche du pilote, l'autonomie décisionnelle en termes de localisation et navigation constitue un des verrous technologique majeur à lever. D'autre part, des travaux sur l'architecture de vol doivent être menés afin d'accroître le temps d'autonomie énergétique de ces mini drones.

**Abstract** – Rotary wings mini-drone have received since few years a great interest for application in the field of civil security. For example, many potential applications exist like monitoring sensitive site, post accident intervention or crowd survey (demonstration, riots...). The objective of this paper is to analyse the present and future state of this technology of robot. It starts by an academic and industrial state of the art of rotary wings mini-drone and describes potential applications of these "new" robots. The analysis of representative scenarios leads to the definition of the main functionalities of the drone in terms of control command, autonomy and communication. The second part of this paper presents the technologic solution (mainly for the control command), developed or to be develop in order to make possible the use of mini drone at a large scale. For communication problems between the ground station and the drone, but also in order to simplify the task of the pilot, decisional autonomy in localisation and navigation is one the key technology that must be solved in the next future. Concerning energy autonomy, researches must be focussed in the development of new flight architecture.

## 1. Introduction

### 1.1 Le concept Drone

Le mot "drone" vient de l'anglais drone, qui veut dire "bourdon". Un drone est un véhicule aérien robotique capable de mener une mission de façon plus ou moins autonome. En d'autres termes, cet appareil peut être contrôlé du sol ou d'un autre aéronef par un utilisateur ou bien dans le cas idéal il est parfaitement autonome pour l'exécution de sa mission. Les deux principaux avantages du drone par rapport à un aéronef standard sont :

- la miniaturisation (voire la très grande miniaturisation) possible, permettant ainsi d'accéder à toute zone d'intervention y compris l'intérieur de bâtiment
- l'évolution dans un environnement dangereux et inadapté aux pilotes humains.

Ces avantages ont été reconnus très tôt dans le domaine militaire mais sont également valables dans le domaine civil.

Plus particulièrement utilisés par les militaires, les premiers drones ont été des engins volants de taille réduite, utilisés pour la reconnaissance, moins chère et plus simple à mettre en œuvre qu'un aéronef traditionnel. Ils sont également plus discrets et leur perte n'est pas aussi lourde

de conséquence que celle d'un appareil complet et de son pilote. Au fur et à mesure que les technologies, électroniques et informatiques notamment progressent, les drones peuvent être utilisés comme plateformes de désignation ou comme armes. Ils sont aussi utilisés comme précurseurs d'opérations, souvent à des fins de recueil de renseignements. Les missions sont alors de la surveillance et de la reconnaissance. Enfin, les drones ont des applications civiles, qui incluent des contrôles sur le trafic, des opérations de recherches aériennes et de sauvetage, des récoltes de données pour la prédiction météorologique...

Les fortes évolutions technologiques ont permis le développement de drones à voilure tournante de plus en plus miniaturisés, de coût modéré et facile d'utilisation. Il en résulte l'émergence de nombreuses applications dans le domaine civil. On identifie alors un très grand nombre d'application pour ces nouveaux outils de reconnaissances qui permettent d'obtenir en quelques minutes une vue globale d'une zone d'intérêt, ou l'accès immédiat à des lieux difficiles.

Dans cet exposé, nous ne nous intéresserons qu'au drone capable d'effectuer un vol stationnaire et nous nous intéresserons plus particulièrement au mini drone de très petites dimensions (moins de 1 mètre) et de faible poids (moins de 10kg). Cette « nouvelle » catégorie de drone

nous semble la plus prometteuse pour des applications dans un très grand nombre de secteurs.

## 2. Etat de l'art académique et industriel

Les tailles des drones capables de faire du vol stationnaire sont très variées : de quelques millimètres à plusieurs mètres. Leur architecture de vol est également très variée ; la plupart sont basés sur le principe de la voilure tournante et sont composés d'un ensemble de rotors à hélice à pas fixe ou variable assurant le vol et son orientation. Enfin dans les laboratoires des prototypes de drones à ailes battante (oiseau) ou aile vibrante (insecte) ont pu être réalisés.

Ce chapitre se propose d'illustrer sans but d'exhaustivité l'état de l'art académique et industriel des mini-drones aptes au vol stationnaire.

### 2.1 La mouche artificielle

Les insectes ont des ailes de forme fixe et assurent leur sustentation en imprimant un mouvement de vibration combinée à une orientation de l'aile. De nombreux laboratoires de recherche cherchent à mimer la nature et tentent de reproduire ce mécanisme de vol. Les travaux les plus en pointe dans ce domaine sont ceux de RJ WOOD Haward Universty.

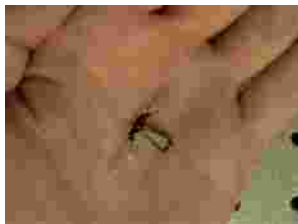


FIG 1 : MOUCHE ARTIFICIELLE – RJ WOOD

Il a développé une mouche artificielle de 60 mg capable de « voler ». Celle-ci possède un corps flexible sur lequel est positionné des ailes ayant une envergure combinée totale de 3cm. Au moyen d'un actionneur piézo électrique les ailes de la mouche sont mises en résonance à une fréquence de 110 Hz, provoquant ainsi un grand débattement. En contrôlant la trajectoire de l'aile, on obtient une poussée suffisante pour permettre à la mouche de se soulever.



FIG2 : « VOL » DE LA MOUCHE

Nous sommes bien loin d'une mouche autonome, le vol n'est pas contrôlé, mais simplement guidé par 2 tiges, l'énergie et l'électronique de commande sont déportées. Il reste donc beaucoup de travaux de recherche avant d'aboutir à un vrai drone, mais ces premiers travaux très innovants ouvrent la route et l'on peut penser que d'ici une à 2 décennies une vraie mouche artificielle sera réalisée.

### 2.2 Micro drone à voilure tournante

Epson détient le record mondial du plus petit léger robot volant. La principale prouesse technologique réalisée par la compagnie Japonaise se situe au niveau de la conception des différents éléments qui constituent de ce micro drone, qualifiés pour chacun « de plus petit et plus léger mécanisme du monde ». Sa masse totale est de 12.3g (8.6g sans la batterie) pour un diamètre de 136mm et une hauteur de 85 mm. Son autonomie est de 3 minutes.

Epson a développé pour cette application des micros moteurs ultrasoniques extra plats qui actionnent les 2 rotors contrarotatifs assurant le vol du drone. La stabilisation d'assiette se fait grâce à un actionneur linéaire actionnant un mécanisme d'équilibrage. La mesure de l'assiette se fait à partir de capteurs gyromètres eux aussi développés spécialement pour cette application afin de répondre aux contraintes de poids et de volume.

L'électronique de contrôle commande est également intégrée dans ce robot volant, rendant autonome le vol du drone. Il est contrôlé à distance via Bluetooth Il dispose également d'une camera numérique qui transmet des images via Bluetooth.



FIG 3 DRONE EPSON  $\mu$ FRII

### 2.3 X4 Flyer AirRobot

La société Allemande AirRobot commercialise un mini drone de type X4 Flyer visant le marché militaire et le marché de la sécurité civile. Cette jeune société, créée il y a seulement 2 ans propose un robot volant ayant un très bon niveau de performance. Elle reprend l'architecture de type X4 (quatre moteurs disposés « en croix » associés à quatre hélices à pas fixes), bien connu dans le domaine des jouets (voir Dragon flyer). Une électronique embarquée assure une stabilisation d'assiette de qualité. Associé à une IHM simple (tablet PC) et efficace le pilotage du robot est ainsi rendu accessible à des non spécialistes.



Fig 4 Drone X4 Flyer de AirRobot

La masse de ce robot est environ 1 kg pour un diamètre de 1 mètre. Il possède une autonomie maximale de 20' qui dépend bien évidemment de la charge utile utilisée (200 g

max). Le constructeur garantit un fonctionnement en extérieur avec des vents de 4m/s.

Le prix de ce drone et de son IHM est aux alentours de 25 k€. AirRobot annonce en avoir vendu plus d'une centaine.

## 2.4 Bertin HoverEye

Bertin Technologies a développé dans le cadre de projet DGA un mini drone à voilure tournante à 2 rotors contra rotatifs carénés. La commande du vol est assurée par 2 déflecteurs orientables permettant de changer la direction du flux d'air. D'un poids total de 3.6 kg pour un diamètre de 80 cm, ce drone embarque une quantité d'équipement très importante apportant au pilote à la fois un confort d'utilisation et un bon retour d'informations.

Il intègre un GPS, un radar d'altitude, un radar périphérique, une centrale inertielle et différentes combinaisons de caméras jour ou nuit. Bertin technologies a beaucoup travaillé sur la problématique de résistance à la rafale et l'HoverEye est capable de résister à un vent de 6 m/s.

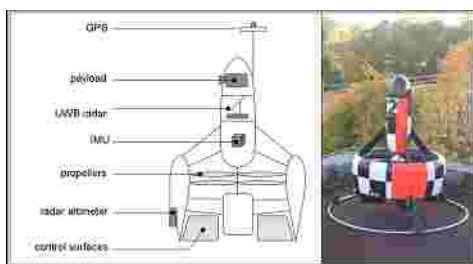


Fig 5 Hovereye Bertin technologies

### 2.4.1 Survey Copter

Au-delà de 10 kg, la plupart des drones à voilure tournante reprennent l'architecture de vol des hélicoptères. A titre d'exemple on peut citer Copter 1b commercialisé par la société Survey Copter. D'une longueur de 2 mètres pour un rotor de 1.8m, il possède une masse à vide de 8.5 kg et une capacité en charge utile de 5kg.

Son autonomie est de 45'. Il est équipé d'une tourelle gyroscopiquement stabilisée et peut effectuer des vols automatiques suivant un plan préprogrammé.



FIG 6 – COPTER 1B- SURVEY COPTER

## 2.5 Conclusions concernant l'état de l'art académique et industriel

On voit, à la synthèse cet état de l'art, que la communauté académique et industrielle est très dynamique.

Rien qu'en France, il existe de nombreuses sociétés qui commercialisent des mini drones à voilure tournante. La revue annuelle « UAV systems – The global perspective » fait référence sur 200 pages à l'ensemble des systèmes UAV du monde.

Les mini ou micro drones à voilure tournante n'existent réellement que depuis moins de 5 ans. On peut les confondre avec des systèmes de modélisme, voire des jouets. Ce qui les différencie, outre leur prix, est bien évidemment la fiabilité de leur vol, la qualité de leur contrôle commande, et leur équipement capteur pour pouvoir effectuer une vraie mission.

Nous proposons dans la suite de ce document de lister quelques cas d'applications des mini drones et d'en déduire s'il y a adéquation entre l'état de l'art industriel et les besoins des utilisateurs finaux. Nous proposerons ensuite pour les besoins non remplis par les UAV VTOL actuels des pistes d'amélioration.

## 3. Applications potentielles des mini drones dans le domaine de la sécurité.

Il existe de nombreuses applications dans le domaine de la sécurité pour les drones. On peut classer ses applications en 3 grandes classes :

- Sécurité civile en milieu urbain (combat de rue, manifestation, terrorisme ...)
- Surveillance de site critique (industrie, aéroports, site nucléaire ...)
- Surveillance de l'environnement (feu de forêt, surveillance de l'évolution de polluant, surveillance des cultures...)

A partir de ces 3 classes, de nombreux scénarios peuvent être évoqués. Nous nous focaliserons sur deux applications qui synthétisent la plupart des besoins.

### 3.1 Scénario 1 – Surveillance de site critique

#### 3.1.1 Description du scénario

Les sites concernés par ce scénario peuvent être des usines (chimique, industrie nucléaire ...), des ports ou aéroports ou tout autre site sensible nécessitant un monitoring constant. Les lieux d'interventions sont parfaitement connus, voire adaptés ou instrumentés pour faciliter le déploiement des drones. Les zones d'intervention peuvent être aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de bâtiments.

L'objectif est de proposer des moyens complémentaires de surveillance aux équipes de gardiennage afin :

- D'améliorer l'efficacité de leur surveillance en proposant un monitoring rapide de toute la zone grâce à des robots mobiles
- De réduire les équipes grâce à une flotte de robots facilement déployable et gérée de manière centralisée depuis un poste de commandement.
- De réduire les risques encourus par les gardiens en cas d'accident majeur.

Dans ce contexte, les tâches les plus probables impliquant un mini drone sont les suivantes :

#### 1) Réponse à alerte

Un capteur fixe ou un agent de sécurité a déclenché une alarme dans une zone du site. L'équipe de surveillance décide alors d'envoyer en toute urgence un mini drone vers la zone incriminée.

Le drone embarque des caméras et tout autre capteur en relation avec le risque lié au site (capteur chimique, radiologique ...). Le drone va rejoindre la zone d'alerte le plus rapidement possible et transmettre les informations souhaitées aux équipes de surveillance pour les aider à l'analyse de la situation.

#### 2) Rondier

De manière régulière, le drone va effectuer un survol du site. A tout moment l'opérateur aura la possibilité d'arrêter le drone sur une zone d'intérêt et de s'approcher au plus près.

### 3.2 Scénario 2 : Incendie, feu de forêt

#### 3.2.1 Description du scénario

L'objectif est de proposer aux équipes de pompiers un nouvel outil pour surveiller et analyser un incendie sur feu de forêt. Cet outil facilement et rapidement déployable pourra être complémentaire aux moyens aériens existants.

Plusieurs scénarios d'utilisation de drones sont possibles pendant les différentes phases du feu de forêt, ils sont listés ci-dessous :

##### 1) Surveillance ou réponse à une alerte

Un drone peut être utilisé pour aller rapidement vers un lieu où une alerte a été déclenchée. Selon les configurations des sites, le drone peut être envoyé soit depuis la caserne des pompiers ou de façon plus réaliste, il est transporté en voiture par les pompiers et déployé à proximité du lieu d'intervention.

Le drone peut aussi être utilisé de manière régulière afin d'effectuer des rondes pendant les jours à risques.

##### 2) Au cours de l'intervention

Un ou plusieurs drones peuvent apporter des informations concernant, le contour du feu, la position des points chauds, la position de zones à protéger d'urgence, en particulier la présence de personnes prisonnières dont les pompiers. La première tâche du drone sera donc un survol des limites de l'incendie puis une analyse plus poussée de l'évolution du feu.

##### 3) Après la maîtrise de l'incendie

Un drone survolera la zone incendiée. Il pourra détecter de manière précises les points chauds susceptibles de ranimer le feu. Il transmettra alors aux équipes la position de ces zones à risque afin d'éliminer tout nouveau risque d'incendie.

### 3.3 Synthèse des besoins

A la lecture des scénarios, il ressort différents besoins peu ou non satisfaits par l'état de l'art académique et industriel présenté en début de document.

#### 3.3.1 Contrôle commande du drone

##### Asservissement d'attitude et commande cartésienne

Il est nécessaire que le drone soit commandé dans un espace cartésien et que le pilote transmette des ordres au drone dans cet espace plutôt qu'au niveau moteur. Un asservissement d'attitude est impératif de telle sorte que l'opérateur ne se soucie pas de la stabilité de son drone mais seulement de ses ordres de translations (X,Y,Z) et de lacet ( $\Theta_z$ ).

##### Asservissement en altitude

Pour faciliter la tâche du pilote, il est relativement aisé d'équiper le drone avec un asservissement automatique d'altitude. Ainsi ce dernier n'a plus qu'à se préoccuper de gérer deux degrés de liberté (déplacement dans un plan) au lieu de trois, ce qui est un avantage non négligeable quand on ne dispose que d'un retour vidéo pour télé-opérer le drone.

##### Commande en vitesse

La commande du vol doit être la plus intuitive possible. Dans un environnement encombré, une simple commande en assiette (assimilable à une commande en accélération) n'est pas suffisante. Il faut pouvoir commander le drone en vitesse afin d'assurer une télé opération précise pour pouvoir positionner le drone à l'endroit souhaité. Pour un robot terrestre, cette tâche est extrêmement simple à réaliser mais pour un robot volant il s'agit d'une fonction beaucoup plus complexe puisqu'il ne dispose pas de capteurs de vitesse suffisamment précis et que l'engin évolue dans un espace à 3 dimensions. Seul le GPS fournit de manière simple cette information mais avec un taux de mesure faible et une pauvre robustesse en milieu urbain.

##### Evitement automatique d'obstacle et résistance aux chocs involontaires.

Au cours de sa mission, le pilote n'a souvent qu'un champ de vision restreint et le drone doit donc pouvoir détecter de manière automatique des obstacles potentiels. La détection de ces obstacles reste encore une problématique car ils peuvent apparaître dans les 3 directions (plafond, poteaux, muret, fil aériens ...) et souffre de l'indisponibilité de capteurs devant répondre à des contraintes multiples (miniaturisation, localisation volumétrique, résolution, distance de détection, rapidité de mesure, etc.). La détection sans faute d'obstacles est illusoire, et dans certains cas le drone devra compter sur une protection mécanique et sa faible inertie pour rebondir sur des obstacles sans pour autant être détruit.

##### Asservissement sur cible naturelle

Pour pouvoir effectuer une surveillance précise, le drone doit être capable de s'asservir visuellement sur un point fixe et y rester tant que l'opérateur le souhaite. Idéalement si ce point fixe se déplace (véhicule) le drone doit être capable de le suivre.

##### Localisation / navigation avec ou sans GPS

Que ce soit pour des missions en vol automatique ou pour pouvoir positionner le drone dans un plan, la fonction de localisation est nécessaire. Le GPS remplit en partie cette fonction avec une précision médiocre pour des

capteurs intégrable sur un micro drone et une robustesse insuffisante en milieu urbain.

### 3.3.2 Résistance aux conditions d'environnement

La résistance au vent et aux turbulences est probablement une des principales limitations à l'utilisation de drone et à fortiori de mini-drone. Les mini-drones ont une inertie très faible et sont facilement emportés par une rafale. D'autre part, leurs moteurs ont une faible puissance et ne leur permettent que de contrer des vents modérés.

### 3.3.3 Communication autonomie et dimensions

#### Communication

En milieu urbain et à l'intérieur d'un bâtiment les communications représentent également une limitation à l'utilisation de drone. A l'intérieur d'un bâtiment au-delà de quelques dizaines de mètres, passés quelques coudes dans un couloir le retour visuel n'est plus assuré. Faute de cette information, l'opérateur n'est plus capable de commander son drone, à moins que celui-ci soit parfaitement autonome en termes de localisation et navigation.

#### Autonomie et dimensions

L'autonomie est clairement reliée aux dimensions du drone. Le tableau ci-dessous synthétise le niveau d'autonomie en fonction de la masse pour les drones présentés dans l'état de l'art.

Drone	Epson	AirRobot	Hovereye	Copter
Masse	12.3g	1 kg	3.6kg	13,5
Autonomie	3'	15'	20'	45'

Les dimensions ne sont évidemment pas les seuls critères, une propulsion électrique et une propulsion thermique présenteront à masse égale des niveaux d'autonomies différents.

Pour atteindre les niveaux d'autonomie souhaités, il est donc préférable d'augmenter la taille et le poids du drone. Ceci est en contradiction avec la facilité d'utilisation, mais surtout limite le champ d'application de ces robots volants.

En se limitant à moins de 1 kg, le danger que peut présenter un drone pour des personnes est faible. A l'inverse, il semble illusoire d'utiliser un drone de plusieurs kilogrammes au dessus d'une foule.

### 3.3.4 Réglementation

Il n'existe pas de réglementation adaptée aux drones actuellement. C'est bien évidemment un point crucial pour le déploiement de drone à grande échelle. Pour aboutir à une réglementation pour ces robots volants sans pilote il faudra qu'ils possèdent une technologie « voir et éviter » leur permettant d'intégrer l'espace aérien comme tout autre engin volant avec pilote.

## 4. Les développements technologiques en cours au CEA List dans le domaine des drones

Ce chapitre présente les travaux du CEA List dans le domaine de mini-drones en relations avec les besoins non satisfaits à ce jour. Ces travaux sont essentiellement tournés sur la partie contrôle commande, quelques pistes de développements seront évoqués pour les problèmes de résistance au vent et autonomie énergétique.

### 4.1 L'architecture de vol choisie – X4 flyer

Le CEA List a développé son prototype de mini drone, en reprenant l'architecture de type X4 Flyer. Cette architecture a été retenue car elle est extrêmement simple à réaliser, elle est bien adaptée aux drones de petites taille et elle est très robuste. Un incident de vol est plus vite réparé et à moindre coût que sur des architectures de type hélicoptère qui possèdent un rotor complexe. Il est d'autre part facile de protéger les hélices par un petit carénage, en s'autorisant ainsi la possibilité d'entrer en contact avec l'environnement sans casse. Enfin, ce robot n'est pas dangereux, sa faible inertie limite les effets des accidents.

Le "X4-Flyer" est un quadrirotor constitué de quatre pales à pas fixe accouplées à des moteurs électriques fixés aux extrémités d'un corps rigide en forme de croix comme le montre la figure ci-dessous.

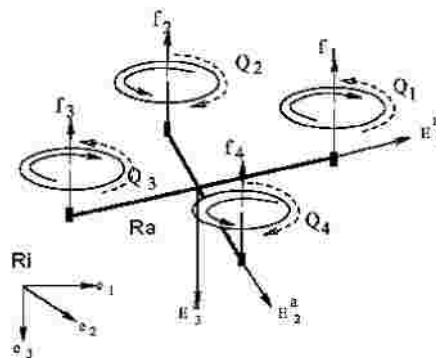


FIG7 ARCHITECTURE DE VOL

Le mouvement vertical de montée et de descente d'un tel appareil est assuré par les quatre rotors à la fois. La différence de poussée entre les moteurs arrière et avant produit un couple de tangage qui contrôle le mouvement de translation (avant/arrière). Le déplacement gauche/droite, quant à lui, est assuré par la différence de poussée entre les rotors situés sur la gauche et sur la droite. Enfin pour le contrôle en lacet de l'appareil, c'est la somme des anticouples produits par les quatre rotors qui définit le sens de rotation. En effet, chaque hélice tournant à une certaine vitesse génère un couple résistant, opposée au sens de rotation. Les sens de rotation des hélices avant/arrière et droite/gauche étant inversés, on peut ainsi annuler ou réguler la somme des 4 couples résistants. Par conséquent, tant que les quatre moteurs sont soumis au même couple

résistant, (tournant à la même vitesse dans notre cas), leur somme est nulle et il n'y a pas de rotation horizontale de l'appareil. Par contre, si on crée une différence de vitesse entre des moteurs tournants en sens inverse, les couples résistants provoquent la rotation de l'engin.

## 4.2 Le prototype du CEA List

Les principaux éléments constituant le drone sont la structure mécanique, l'ensemble moteur / hélice, l'électronique embarquée / capteurs, puis le poste sol.

### 4.2.1 La structure mécanique

La structure est la partie permettant d'unir les différents composants du drone comme les moteurs, les cartes électroniques, la batterie...

Le premier drone construit est constitué de quatre tubes en carbone rigides de faible diamètre permettant l'optimisation de son poids et reliant les rotors à la partie centrale via un hub. Les centres de gravité et aéro se situent approximativement à l'intersection des tubes. La distance entre les axes des rotors est de 48cm. Le principal défaut de cette structure concerne la rigidité de l'ensemble, occasionnant des vibrations importantes aux alentours des 12Hz lors d'un réglage trop "raide" de l'asservissement.

Une seconde version du drone a permis d'obtenir une meilleure rigidité de la structure grâce à l'utilisation d'un treillis tubulaire représenté sur la figure 8. Grâce à cette modification, un bon réglage des gains peut alors permettre un comportement plus nerveux du système, sans oscillation issue des modes de résonance de la structure.



FIG 8 X4 FLYER 2<sup>ND</sup> GENERATION DU CEA LIST

### 4.2.2 Motorisation

La motorisation constitue la partie la plus critique du dimensionnement du drone, pour laquelle le principal critère est le poids. De ce choix, va dépendre l'autonomie de vol, ainsi que la masse embarquable. De plus, les moteurs doivent être dimensionnés avec les hélices qui vont être utilisées de façon à ce que la plage de fonctionnement optimale du moteur (pour laquelle le rendement est maximal) et de l'hélice coïncide.

Le prototype du CEA List utilise des moteurs à courant continu. Ils ont été préférés dans un premier temps aux moteurs brushless car ils ne nécessitent pas le développement d'un étage électronique supplémentaire pour le contrôle en vitesse du moteur. Cependant cet argument est à rejeter car leur fiabilité est moindre ainsi

que leur rendement. Une nouvelle version du drone équipé de moteur brushless est en cours de conception. Elle permettra d'obtenir un gain de poussée d'environ 30%

### 4.2.3 Les capteurs

Afin d'être fonctionnel, le drone nécessite l'ajout de capteurs embarqués pour pouvoir se situer dans son environnement. Bien des capteurs se différenciant notamment par leur coût, leurs performances et leur poids, sont disponibles dans le commerce. Comme pour le choix des moteurs, le principal ennemi du drone reste son poids, par conséquent, les capteurs les plus lourds et généralement les plus performants ne sont pas envisageables. Le capteur parfait n'existant pas, afin de bénéficier d'une bonne estimation de l'état du véhicule, plusieurs capteurs de nature différente doivent être utilisés de façon à combler les déficiences de chacun.

Capteurs inertiels: Une centrale inertielle adaptée aux contraintes de poids du mini drone a été développée. Elle intègre pour les 3 directions de l'espace une mesure d'accélération (accéléromètre) et une mesure de vitesse de rotation (gyromètre). Les capteurs utilisés sont issus des technologies MEMS (Micro Electro Mechanical System). Ils sont basés sur les procédés de fabrication de la microélectronique et offrent des mesures performantes tout en étant léger et de petite taille. L'avènement de cette technologie de capteur inertielle a permis de lever l'un des principaux verrous pour la conception de micro drone autonome.

L'accéléromètre utilisé est le composant ADXL203 d'Analog Device et offre une plage de mesure de +/- 1.7g. Sa sensibilité est de 0.65mg à 40Hz de bande passante. Le Gyromètre ADXRS150 utilisé dispose d'une plage de mesure de +/-150°/s. Sa sensibilité est de 0.25°/s à 40Hz de bande passante.

Proximètres: Les proximètres sont utilisées pour mesurer la distance entre le drone et les obstacles environnants. Plusieurs technologies sont envisageables pour les mini-drones, les capteurs infrarouge et les capteurs ultrasons.

Magnétomètres: Les magnétomètres sont utilisés pour mesurer les composantes du champ magnétique terrestre et ainsi retrouver le Nord magnétique. L'inconvénient majeur de ce type de capteur est la grande sensibilité aux perturbations extérieures comme le champ tournant généré par les moteurs électriques, ainsi qu'aux déviations du champ magnétique terrestre engendrées par les masses métalliques environnantes. De ce fait, il est difficile de les utiliser à l'intérieur d'un bâtiment. Voir cependant [1].

Caméra embarquée: Afin de permettre l'acquisition d'images d'une scène se déroulant au niveau du sol, une caméra est placée sous le drone. Nous verrons par la suite que cette caméra embarquée est aussi très utile en tant que capteur de localisation. Le poids de l'ensemble caméra + objectif est de 12,3g. Elle est connectée à un émetteur d'un poids de 7g. Le drone rapatrie alors ces images vers une station au sol via une liaison HF analogique. Le temps de

latence pour mettre à disposition du poste sol les images issues de la caméra embarquée peut atteindre 110ms. En incluant ensuite les algorithmes de traitement d'image on voit que le retard pour la commande du drone est important, ce qui limite l'efficacité de ce capteur si l'on déporte l'unité de calcul au poste sol. Une évolution du drone afin d'embarquer le traitement d'image est en cours.

**GPS:** Pour des applications en milieu extérieur ouvert, le drone intègre un capteur GPS. Le module utilisé, de marque LocSense LS40MM offre une précision de positionnement de 5m pour une fréquence d'acquisition de mesure de 1Hz. Xsense propose dans un format équivalent un module GPS à 4Hz, couplé à une centrale inertielle.

L'ensemble de ces capteurs sont reliés à une électronique embarquée qui assure leur traitement et le contrôle du vol du drone et la communication avec le poste sol. Le poste sol est lui constitué d'un PC portable qui effectue la transmission des commandes d'attitude et de lacet au drone, affiche le retour vidéo et les télémétries.

## 5. Contrôle commande du X4 Flyer du CEA List

Afin de répondre aux besoins identifiés dans le chapitre 3, les travaux de recherche du CEA List se sont focalisés sur le contrôle commande de son prototype X4-Flyer afin de pouvoir à terme réaliser les missions présentés.

### 5.1 Stabilité d'attitude

Cette architecture mécanique minimale présente un inconvénient, elle est très instable. Une faible variation de vitesse sur un moteur ou un défaut mécanique entraîne la chute du robot. Pour simplifier la tâche du pilote et résumer la commande à des simples ordres d'avances, il est nécessaire d'asservir l'assiette du drone. La centrale inertielle présentée dans le chapitre précédent est utilisée à cet effet. La fusion des données issues des gyromètres et des accéléromètres va permettre d'obtenir un estimateur performant de cette assiette et ainsi de stabiliser le drone avec une fonction d'asservissement adaptée.

Les gyromètres mesurent la vitesse 3D de rotation du drone. Leur intégration dans le temps permet de prédire l'assiette de l'engin à tout instant. Cependant, la présence d'un biais fonction de paramètres extérieurs comme la température, génère une dérive basse fréquence de l'odométrie induisant ainsi une erreur sur l'assiette qui s'accumule au cours du temps si elle n'est pas recalée. En plus du signal utile, un bruit d'origine électrique et mécanique s'ajoute.

Les accéléromètres utilisés ici comme inclinomètres, mesurent les composantes de la gravité et permettent de recalculer la prédiction (odométrie) des précédents gyromètres.

Cependant, même si ces capteurs mesurent la grandeur que l'on cherche à estimer, ils mesurent également les accélérations "parasites" dues aux déplacements du drone. Si on considère ces accélérations comme transitoires, la

partie utile du signal pour mesurer la verticale se situe dans les très basses fréquences.

Pour estimer l'assiette du drone on fusionne donc les mesures d'accélération et les mesures de rotation dans un filtre complémentaire. On applique un filtre passe-haut aux gyromètres et un filtre passe-bas aux accéléromètres. Cette fusion permet de mesurer l'assiette du drone avec une précision de l'ordre de  $0.5^\circ$ . [2]

### 5.2 Contrôle du lacet

Alors que l'estimation de la verticale permet de mesurer l'inclinaison du drone dépendant des angles de roulis et de tangage, elle ne permet pas l'estimation de l'angle autour de l'axe vertical. Pour estimer l'angle de lacet, on dispose de l'odométrie issue de l'intégration du gyromètre porté par l'axe de lacet, mais d'aucun moyen de recalage de celle-ci. Effectivement, en vol stationnaire, la mesure de gravité, confondue avec la verticale, ne peut renseigner sur le cap du drone. Par conséquent, une autre mesure extéroceptive serait nécessaire pour effectuer le recalage.

Le champ magnétique terrestre étant constant et disposant d'une grande composante perpendiculaire à la verticale, sa mesure peut constituer une bonne information sur le cap. Cependant, sa mesure via des magnétomètres s'avère inefficace en intérieur du fait des nombreuses perturbations existantes liées à l'environnement. Par conséquent, l'estimation du lacet n'est issue que de l'intégration du gyromètre porté par l'axe de lacet auquel on hôte les biais estimés. Le recalage, en cas de dérive, est soit laissé à l'opérateur qui, constatant la dérive, modifie la commande appliquée pour se replacer dans l'axe désiré, soit issu d'un autre estimateur disposant d'autres capteurs comme une caméra et permettant l'estimation du lacet.

### 5.3 Contrôle de l'altitude et atterrissage automatique

Un télémètre à ultrason est utilisé pour mesurer la distance sol/drone. Celui-ci est placé sous le drone, 2cm sous le plan des rotors, et est dirigé vers le bas. Il fournit alors une mesure de distance toutes les 36ms. Ce type de capteur étant très léger et de bon marché, il peut arriver que la mesure de hauteur soit dégradée, en fonction de la qualité du sol qui réfléchit l'onde, ou des échos possibles d'obstacles aux alentours perturbant la mesure. De ce fait, la première étape dans la mise au point d'un tel asservissement est la synthèse d'un filtre capable de détecter et d'éliminer ces points aberrants.

On note également que la mesure de ce capteur n'est plus valable au dehors d'une plage comprise entre 10cm et 3 à 4m suivant la nature du sol. Par conséquent, on ne prendra plus en compte la mesure en dehors de ces limites.

Pour rendre fiable cette mesure de hauteur, on adjoint au télémètre ultrason, les mesures d'accélération verticale que l'on intègre et un baromètre qui à partir de la mesure de la pression atmosphérique fournit une estimée relative de la hauteur à 40cm près. Le recalage de la position issue de la double intégration de l'accélération est effectué soit à partir

des mesures du capteur ultrason ou à partir des mesures du baromètre. Grâce à un retour de hauteur stable, on estime ensuite la vitesse de translation sur cet axe nécessaire à l'algorithme de stabilisation ou d'atterrissage automatique.

A faible hauteur des effets de sol importants viennent modifier la poussée effective des hélices. Une estimation du coefficient de poussée en fonction de l'altitude est implémentée dans la commande en altitude du drone pour palier ces effets parasites. [3]

## 5.4 Commande en vitesse – asservissement sur cible

Pour effectuer cette commande, il semble naturel d'utiliser les signaux issus du GPS pour asservir en vitesse le drone. Cette fonction a été développée sur le prototype du CEA. Ces performances sont limitées par la faible récurrence du signal vitesse (1Hz), et sa médiocre résolution aux faibles vitesses. D'autre part, cette commande en vitesse par GPS n'est exploitable qu'en milieu ouvert. L'intérieur de bâtiment ou un environnement urbain dense sont des lieux inappropriés pour l'exploitation des signaux GPS pour une commande en vitesse du mini drone.

Nous nous sommes penchés sur des techniques adaptés à des environnements contraints. A partir de la vision, il est possible de faire la synthèse d'un algorithme permettant l'estimation complète de l'état du drone en translation et orientation.

Ce principe a été mis en œuvre en utilisant une cible artificielle de dimensions connues. Cette méthode, nous le verrons ensuite est transposable à des cibles naturelles de dimensions inconnues extraites de l'environnement de progression du drone. [6]

La cible utilisée est plane et constituée de 4 cercles noirs sur fond blanc. Ses dimensions sont 35x35cm. Un algorithme basé sur le filtrage particulaire permet, en utilisant les données de la centrale inertielle et les centres des cercles, d'estimer la position 3D du drone. Le fonctionnement de cet algorithme peut être décrit comme suit :

Le passage d'une position de référence à la position courante, est composé d'un mouvement de rotation et de translation. La rotation étant celle du drone, elle est déjà estimée par les algorithmes de filtrage complémentaire détaillés dans le chapitre 4.3. De ce fait, son effet peut alors être compensé dans l'image. Ensuite, la différence entre la position des points dans l'image d'origine et celle perçue par la caméra est uniquement due à un mouvement de translation que l'on estime via une méthode statistique.

Afin de juger de la qualité du retour 3D synthétisé, cet estimateur de pose a pu être comparé aux mesures d'un appareil de métrologie LEICA haute précision. En régime dynamique, on constate l'existence d'un retard important, de l'ordre de la demi seconde, du à la convergence de l'algorithme de reconstruction de pose. Ce retard pourrait cependant être atténué par d'autres réglages du filtrage particulaire au détriment de sa précision ou par l'utilisation

d'autres capteurs comme les accéléromètres lors de la prédiction. En statique, on observe une bonne convergence de l'algorithme donnant une mesure assez fidèle de la pose du drone. Globalement, la position sur les axes X et Y est relativement précise et évaluée à moins de 10cm.

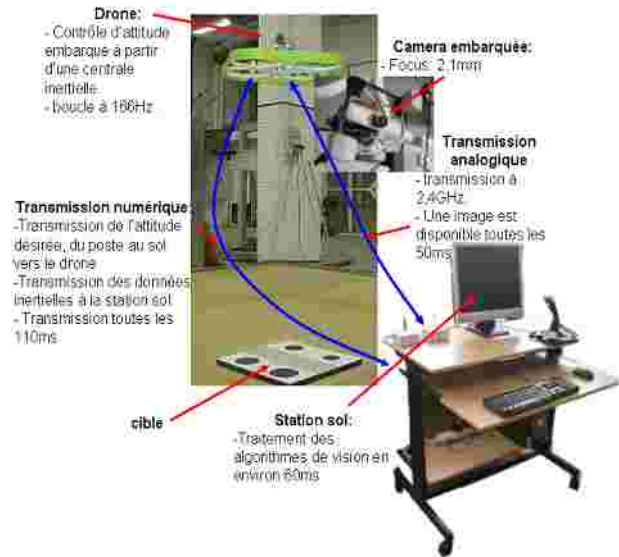


FIG 9 DETAIL DE L'ARCHITECTURE DU SYSTEME

A partir des données visuelles, il devient donc possible d'une part d'effectuer une commande en vitesse du drone et d'autre part, d'effectuer des trajectoires automatiques autour de la cible. Le lecteur trouvera sur le site [www.ist-microdrones.org](http://www.ist-microdrones.org) un ensemble de vidéos présentant les expérimentations de ces travaux de recherche.

## 5.5 Localisation navigation autonome par vision

Selon ce principe des travaux sont en cours en s'affranchissant de la cible artificielle.

On peut classer les méthodes en 2 classes distinctes :

- Asservissement visuel par reconstruction 3D de l'environnement
- Asservissement visuel dans l'espace du capteur de vision

### Asservissement visuel par reconstruction 3D

Dans un premier temps le robot est guidé manuellement et il enregistre une séquence d'images de référence avec un système vidéo monoculaire. Dans chaque image de référence un algorithme extrait des points d'intérêt. Ceux-ci sont ensuite mis en correspondance entre 2 images successives. On effectue ensuite entre chaque image une estimation de la pose de la caméra et une construction de la carte de l'environnement constituée d'un nuage de points 3D référencés.

Lorsque le robot navigue dans l'environnement appris, il extrait de nouveau les points d'intérêt, effectue une mise en correspondance avec ceux de sa carte et enfin se localise.

Cette technique est relativement maîtrisée dans le monde de la robotique terrestre, dans des conditions favorables au

niveau vision (variation de luminosité, environnement texturé...)[4] Le CEA List travaille en collaboration avec le LASMEA (Université Clermont-Ferrand) pour l'adapter à des robots volants et la rendre plus robuste en fusionnant les données visuelles avec les autres capteurs du drone.

#### Asservissement dans l'espace du capteur de vision

Contrairement à un asservissement visuel 3D, cette technique ne nécessite pas la lourde étape de reconstruction 3D de l'environnement décrit précédemment. Les asservissements sont réalisés au niveau du capteur de vision. A chaque configuration de la caméra  $(\theta, R)$  on considère un vecteur de sortie  $S((\theta, R), t)$  établi à partir d'informations visuelles extraites de l'image, relatif à la perception d'amers de la scène. Ce vecteur de sortie est utilisé pour localiser le robot à partir d'images apprises et générer des trajectoires automatiques en visant un vecteur cible  $S^*$ . [5]

Cette technique est également maîtrisée au niveau de la robotique terrestre, en restant comme pour les algorithmes précédant dans des conditions favorables pour la vision. Des premiers résultats encourageants ont été obtenus fin 2007 par le CEA sur cette technique qui souffre cependant encore de problèmes de robustesse.

L'ensemble de ces travaux d'asservissement visuels sont réalisés dans le cadre du projet européen IST  $\mu$ Drones et devraient aboutir à un contrôle fiable et robuste du drone d'ici 18 mois

## 5.6 Evitement automatique d'obstacle

La détection des obstacles dans un environnement 3D est un problème complexe si l'on veut le résoudre de façon robuste. Les techniques classiques de la robotique basées sur des télémètres ultrasons ou infrarouges sont utilisables sur les mini drones mais les résultats obtenus sont très dépendants de la nature des obstacles et de leurs formes. Dans ces conditions, il est souhaitable de les améliorer en associant cette technologie à d'autres afin d'augmenter la robustesse de la détection et de l'évitement.

Pour le contrôle de leur vol, les insectes utilisent la vision et des capteurs gyroscopiques. Leurs yeux sont sensibles aux mouvements d'image (le flot ou flot optique). A l'aide de ses capteurs, l'insecte est capable de stabiliser sa trajectoire, maintenir son altitude, ainsi que d'éviter des obstacles [7]. Cette méthode est transposable aux mini drones et des travaux sont en cours au CEA List pour implémenter une stratégie d'évitement d'obstacle basé sur le flot optique. Le principe général de la méthode proposée est le suivant : à partir d'informations sur le flot optique et plus précisément entre la différence entre le flot gauche et le flot droit du capteur de vision on peut définir des fonctions d'attraction/répulsion qui permettent d'orienter le drone, d'estimer sa vitesse, des fonctions de centrage automatique dans un environnement encombré, et également des fonctions permettant d'assurer sa « survie » par évitement réflexe des obstacles.

Ces travaux sont très récents et devraient aboutir d'ici deux ans dans le cadre du projet FRAE Naviflow.

## 5.7 Résistance à la rafale

Aucun travail d'envergure n'a été mené par le CEA List dans ce domaine. D'autres équipes comme par exemple Bertin technologies ont travaillé sur ce problème et proposé des premières solutions. [8]

Outre les travaux sur une architecture de vol « résistante » ou mieux adaptée aux mauvaises conditions aérologiques, au niveau contrôle commande, ce problème majeur doit être traité de 2 manières complémentaires :

- La première et la plus naturelle, consiste à développer un asservissement d'attitude le plus robuste possible et apte à réagir rapidement à toute perturbation.

- La seconde méthode consiste à être tolérant à la rafale plus qu'à lui résister. Il ne sera jamais possible sur des mini drones de disposer d'une puissance suffisante pour contrer toute perturbation aérologique. Des stratégies comportementales doivent donc être élaborées pour dériver face à des perturbations trop fortes tout en conservant un vol stable.

La seconde stratégie est à ce jour peu traitée par la communauté scientifique. C'est sur ce point qu'il faudra concentrer les travaux pour obtenir des mini drones capables d'effectuer des missions même dans des conditions météorologiques difficiles.

## 5.8 Autonomie énergétique

L'état de l'art académique et industriel a montré que l'autonomie énergétique chutait avec les dimensions des drones. Avec un minimum de charge utile, on obtient environ 15 minutes d'autonomie pour un drone de 1kg. Pour des drones de plus petite taille l'autonomie devient tellement faible qu'aucune application hors recherche n'est actuellement envisageable.

Les dimensions et surtout le poids sont pourtant des paramètres clés pour l'usage de drone à grande échelle. Le drone doit être facilement transportable et il doit présenter le moins de danger possible en cas de chute. Sans cela, on imagine difficilement comment ils pourraient être utilisés au dessus d'une foule par exemple.

Les technologies de batteries évoluent mais il semble illusoire d'imaginer un gain très important dans les prochaines années. Les micros-piles à combustible pourraient constituer une alternative intéressante. Cependant, les premiers calculs effectués avec des laboratoires de recherche spécialisés dans ce domaine montrent qu'à ces échelles, il n'y a pas de miracle et qu'un gain tout au plus de 30% est envisageable à moyen terme.

La solution semble être plus au niveau de l'optimisation de l'architecture de vol que sur une technologie de stockage d'énergie embarquée. L'autonomie énergétique d'un robot volant à voilure tournante n'est pas bonne. D'autre part, les voilures fixes ont de bien meilleurs rendements mais ne peuvent pas effectuer de point fixes et sont mal adaptées à des environnements étroits et encombrés. La solution est dans la nature, les ailes battantes présentent les avantages des 2 architectures de vols précédentes (point (quasi) fixe et bon rendement énergétique). C'est probablement dans cette

direction que les travaux de recherche doivent se porter pour disposer à terme de mini drone ayant une autonomie énergétique importante. La tâche est cependant très ardue car il faut d'une part concevoir un mécanisme d'aile conformable intégrant de nombreux actionneurs/capteurs répartis sur sa surface et d'autre part développer le contrôle commande complexe de cette architecture de vol.

Concernant le contrôle commande on pourra se référer aux travaux du l'ISIR.[9]

Pour l'architecture de vol, le CEA List a développé un outil logiciel de conception de systèmes à mécanisme flexible intégrant de manière optimale des capteurs et actionneurs répartis dans la structure.

La figure ci-dessous illustre le concept. Pour de petits systèmes, l'assemblage de micro mécanisme est trop complexe et coûteux. Il est préférable de concevoir le même mécanisme en utilisant des matériaux flexibles qui sous l'action d'une force donnée à un point d'entrée généreront le mouvement et la force souhaités au(x) point(s) de sortie.

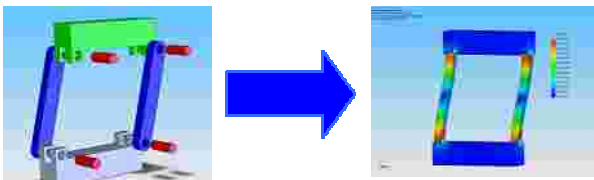


FIG 10 MECANISME FLEXIBLE

Cette technologie de conception basée sur les mécanismes flexible est donc très prometteuse, le CEA List souhaiterait s'associer avec d'autres laboratoires de recherche travaillant sur les architectures de vol battu pour développer un prototype.

## 5.9 Communication

A l'intérieur d'un bâtiment, sans pré équipement il est difficile de transmettre un retour vidéo fiable au-delà d'une certaine distance. Des nouvelles technologies de transmission basée sur le WiMAX par exemple peuvent permettre de mieux gérer les dégradations apportées par les multiples réflexions et atténuations observées dans un environnement intérieur et fiabiliser la communication. En contrepartie, ces technologies induisent parfois des temps de latence conséquents qui peuvent nuire à la télé-opération d'un drone. D'autre part, même si les gains obtenus grâce à ces technologies de transmission seront importants, la grande bande passante nécessaire à la transmission des signaux vidéos sera toujours un frein à l'utilisation de robot téléopéré dans un environnement urbain ou à l'intérieur de bâtiment. La solution est donc dans le développement de robot autonome en terme de localisation, navigation et évitement automatique d'obstacle ne nécessitant plus un retour vidéo temps réel mais un retour d'images ou d'événements clés sur une liaison de communication bas débit. .

## 6. Conclusions

Des progrès très importants sont apparus ces dernières années dans le domaine des mini drones à voilure tournante, permettant de passer du modélisme à de la véritable robotique. Des produits industriels existent permettant de remplir certaines missions dans des conditions bien précises (distance entre l'utilisateur et le drone faible, vent modéré, temps de la mission inférieur à environ 15' pour des drones de moins de 1 kg). Des travaux de recherches doivent être poursuivis pour permettre une plus large utilisation de ces robots. Ils doivent se concentrer sur l'autonomie décisionnelle en localisation, navigation et évitement d'obstacle, sur la tolérance (et non uniquement résistance) à la rafale et sur une architecture de vol assurant une autonomie énergétique plus importante.

## 7. Remerciements

Les travaux du CEA List dans le domaine des mini drones sont réalisés dans le cadre du projet européen IST  $\mu$ Drones et des projets nationaux FRAE Naviflow, ANR SCUAV et MOBISIC du pôle system@tic.

## Références

- [1] D.Vissiere, A.Martin, and N.Petit. Using magnetic disturbances to improve imu-based position estimation. *European Control Conference*, 2007.
- [2] N.Guenard, T.Hamel, and V.Moreau. Modélisation et élaboration de commande de stabilisation de vitesse et de correction d'assiette, *CIFA 2004*, Douz, Tunisie, 2004.
- [3] N.Guenard, T.Hamel, and L.Eck. Control laws for the tele operation of an unmanned aerial vehicle known as an x4-Flyer. IROS, Beijing, China, 2006.
- [4] E. Royer - Thèse : Cartographie 3D et localisation par vision monoculaire pour la navigation autonome d'un robot mobile - 2006
- [5] O.Bourquardez, R.Mahony, N.Guenard, F.Chaumette, T.Hamel, and L.Eck. Kinematic visual servo control of a quadrotor aerial vehicle. *Rapport de recherche IRISA n°1858*, 2007.
- [6] N.Guenard, T.Hamel, and R.Mahony. A practical visual servo control for a unmanned aerial vehicle. In *Proceedings of International Conference of Robotics and Automation, ICRA2007*, Roma, Italy, 2007.
- [7] J. Serres, Ruffier F., Viollet S., Francecchini N. Toward optic flow regulation for wall following non centring behavior. *International Journal of Advanced Robotics systems* Vol 3 N°2 P147-153
- [8] J.M. Pfimlin. Thèse : Commande d'un minidrone à hélice carénée. 2006.
- [9] S. Doncieux, Mouret J.B., Meyer J.A. Soaring behavior in UAVs: 'animat' design methodology and current results 7th European Micro Air vehicle conference MAV07, Toulouse