

Drones civils

Perspectives et réalités

Pascal Brisset
École Nationale de l'Aviation Civile

Août 2004

Résumé

Les drones, aéronefs autonomes et/ou pilotés depuis le sol sont à la mode. Leur usage lors des conflits récents a été largement médiatisé et les revues spécialisées sont pavées de photos de ces engins aux formes souvent très originales comparés aux aéronefs traditionnels. Les objectifs des drones militaires sont divers et leurs utilisations sont facilement justifiables par un environnement « hostile » où la sécurité des pilotes est délicate à assurer. L'absence de pilote permet également la conception de «petits» drones, micro-drones (quelques dizaines de grammes) ou mini-drones (quelques kilogrammes).

Pour des raisons similaires, de nombreuses applications civiles sont candidates à l'utilisation de drones, gros ou petits. Nous tentons dans ce document de faire un état de l'art du domaine en présentant la technologie disponible, les applications envisagées et les aspects réglementaires, sujet de réflexion important tant pour les industriels du secteur que pour les organismes de navigation aérienne. Dans un second temps, nous présentons le projet Paparazzi, prétexte qui a motivé cette étude, dont l'objectif est le développement d'un mini-drone initialement destiné à l'enseignement et à la recherche. Le drone Paparazzi, développé avec Antoine Drouin, a remporté les deux premières compétitions européennes de mini-drones en vol autonome.¹

¹Note : La version électronique, accessible à www.recherche.enac.fr/~brisset, de ce document contient de nombreux hyperliens qui n'apparaissent pas dans la version imprimée.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 2 |
| 1 État de l'art | 6 |
| 1.1 Les drones, avant tout militaires | 6 |
| 1.2 Applications civiles | 11 |
| 1.2.1 Application selon masse et altitude | 11 |
| 1.2.2 Quelques applications concrètes | 12 |
| 1.3 Réglementation | 15 |
| 1.3.1 L'aéro-modélisme | 15 |
| 1.3.2 L'USICO | 16 |
| 1.3.3 Les propositions du <i>JAA/Eurocontrol UAV Task Force</i> | 17 |
| 2 Le projet Paparazzi | 24 |
| 2.1 Historique | 24 |
| 2.2 Le système Paparazzi | 31 |
| 2.2.1 Les composants | 31 |
| 2.2.2 Mise en œuvre | 36 |
| 2.3 Perspectives | 42 |
| Conclusion | 44 |

Introduction

Même si le terme « drone » n'a pas encore rejoint les dictionnaires français², il est aujourd'hui largement utilisé pour désigner un « aéronef sans pilote », quelque soit sa taille, sa forme, sa fonction et ses caractéristiques. Drone peut désigner n'importe quel objet volant depuis le cerf-volant jusqu'au missile de croisière en passant par le modèle réduit radio-commandé³ et le ballon captif. On retiendra donc la définition anglo-saxonne :

Drone : an aircraft without a pilot that is operated by remote control

On peut noter dans cette définition qu'un drone :

- est contrôlé, i.e. qu'il n'est pas complètement autonome ;
- n'est pas contrôlé nécessairement depuis le sol, i.e. qu'il peut être piloté depuis un autre aéronef ;
- peut transporter des passagers.

Drones civils La multiplicité des drones a été catégorisée depuis longtemps[2] pour les applications militaires : la table 1 donne un aperçu de l'amplitude des caractéristiques en masse et en performance⁴. Ces différentes caractéristiques correspondent naturellement à différentes applications.

Les deux principaux avantages du drone par rapport à un aéronef standard sont⁵ :

- la miniaturisation possible ;
- l'évolution dans un environnement «3D», «Dull, Dirty and Dangerous» (monotone, sale et dangereux), inadapté aux pilotes humains.

Ces avantages ont été reconnus très tôt dans le domaine militaire mais sont également valables dans le domaine civil. La miniaturisation permet de réduire les coûts de fabrication et de fonctionnement. Par exemple une photo aérienne prise par un ballon captif de 2.4m de diamètre (société Phodia ou Aerovue par exemple) revient plus de 10 fois moins cher qu'une photo prise depuis un hélicoptère traditionnel. La réduction de la taille permet également une mise en œuvre plus simple qui ne nécessite ni installations au sol ni expert en pilotage. On retrouve également les «3D» à travers des missions civiles de surveillance,

²Voir par exemple en ligne le Trésor de la Langue Française

³On parlera d'aéro-modélisme pour un modèle réduit «jouet» et de drone pour un modèle réduit à mission «commerciale».

⁴Les catégories «micro» et «nano» ont été omises faute d'éléments concrets les concernant.

⁵Les engins non récupérables comme les fusées et les missiles ne sont, en général, pas classés parmi les drones.

TAB. 1 – Quelques catégories de drones (CR, SR et MR pour Close, Short et Medium Range, EN : Endurance, L(MH)ALE : Low (Medium, High) Altitude Long Endurance)

| | Micro | Mini | CR | SR | MR | LALE | MALE | HALE |
|------------------|-------|------|--------|--------|---------|-------|----------|-------------|
| R. d'action (km) | <10 | <10 | 30 | 70 | 200 | >500 | >500 | >2000 |
| Alt. max. (m) | 250 | 3000 | 3000 | 3000 | 5000 | 3000 | 8000 | 5 to 15.000 |
| Endurance (h) | 1 | <2 | 2 to 4 | 3 to 6 | 6 to 10 | >24 | 24 to 48 | 24 to 48 |
| Masse (kg) | < 5 | < 30 | 1 | 50 | 200 | 1.250 | 10.000 | 12.000 |

qui peuvent durer plusieurs heures ou plusieurs dizaines d'heures, et/ou des évolutions dans des environnements industriels hostiles (centrale nucléaire accidentée, industrie chimique, ...). En fait, n'importe quelle activité aérienne est candidate à être effectuée par un drone et les deux principales questions qui se posent concernent la technologie à utiliser et la réglementation.

La technologie des gros drones, de taille analogue aux avions pilotés, peut être très similaire à celle des avions standards : l'interface, notamment grâce aux commandes électriques, qui lie un pilote à sa machine est largement dématérialisée et est déportable au sol très simplement ; il s'agit essentiellement de remplacer une connexion filaire par un *datalink* sans fil. La suppression de la vision du pilote vers l'extérieur de l'avion pose des problèmes plus difficiles à résoudre du point de vue réglementaire que technique.

La technologie des petits drones est nettement moins mûre. Pour une bonne partie, cette technologie existe et est utilisée avec succès par les aéro-modélistes. Cependant elle ne peut pas être transposée directement dans le cadre d'applications commerciales ; objectifs, performances, fiabilité, coûts, etc, sont à reconsidérer dans ce contexte. D'autre part, si le pilotage depuis le sol à vue est maîtrisé par les modélistes, il n'est pas suffisant pour des applications où un certain degré d'«autonomie», de vol et navigation automatiques, sont nécessaires.

L'autre difficulté d'utilisation d'un drone civil aujourd'hui est liée à la réglementation ou plus précisément à l'absence de réglementation, nationale et internationale, concernant la construction et la circulation d'un drone. La situation actuelle a été résumée par l'USICO, un groupe de travail européen qui s'est intéressé à la sûreté des drones civils, à travers un «cercle vicieux» reproduit en figure 1 : les utilisateurs potentiels de drones civils attendent une offre des constructeurs ; ces derniers ne peuvent pas produire tant que la réglementation n'existe pas ; le législateur attend que les applications civiles apparaissent pour définir cette réglementation. Cette situation n'est cependant pas bloquée puisque des travaux concernant la réglementation ont débuté dès 2002 au sein du JAA/Eurocontrol UAV Task Force qui a produit, début 2004, un rapport détaillant une étude et des recommandations quant à l'adaptation nécessaire de la réglementation existante à l'intégration de drones civils dans le trafic aérien. Aux États-Unis, une étude ⁶ a été lancée fin 2003 par la NASA visant à permettre l'intégration de drones au trafic civil d'ici 2008.

⁶ *Drones May Be Allowed to Share U.S. Skies*, Washington Post, October 2003.

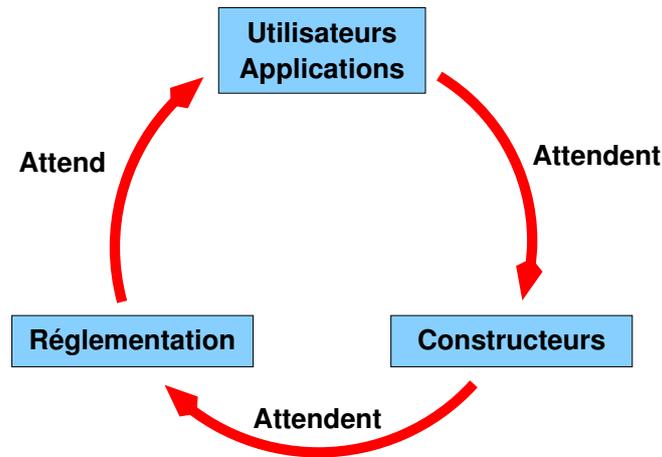


FIG. 1 – Situation actuelle pour l’usage de drones civils selon l’USICO

Le projet Paparazzi La technologie des mini-drones et des micro-drones est relativement récente et encore mal maîtrisée. Les thèmes abordés par la conférence EMAV 2004⁷ témoignent des problèmes posés par la réalisation d’aéronefs de petite taille : contrôle, capteurs, matériaux, propulsion, énergie, aérodynamique, ailes battantes, ... La miniaturisation (masse, encombrement et consommation faibles) interdit l’utilisation des composants standards de l’aéronautique. La mécanique des fluides aux petits nombres de Reynolds est mal connue. Les performances des calculateurs embarqués sont nécessairement réduites. Les coûts de développement envisagés pour des micro-drones sont par ailleurs faibles comparés aux projets standards. Ce domaine d’activité en est donc au stade de la recherche, fondamentale et appliquée.

Depuis début 2003, le projet Paparazzi, conduit avec Antoine Drouin⁸, s’intéresse au développement d’un micro-drone avec les principaux objectifs suivants :

- utilisation de la technologie aéro-modélisme, en particulier en utilisant du matériel grand public ;
- développement d’un pilote automatique, *hardware* et *software*, permettant au drone d’être complètement autonome, pour se maintenir en vol et pour effectuer une «mission» prédéterminée ;
- développement d’un environnement de développement complet permettant d’installer simplement le système sur des aéronefs variés ;
- développement d’une station sol de contrôle et de suivi du vol.

Un des aspects essentiels du projet est son aspect «ouvert», dans l’esprit du logiciel *open source* : l’intégralité du développement est publié au fur et à mesure afin d’être partagé, commenté et utilisé par l’ensemble de la communauté intéressée. L’ensemble des travaux est distribué sous licence GPL qui permet la réutilisation par le plus grand nombre tout

⁷First European Micro Air Vehicle Conference, Braunschweig, Germany, Juillet 2004

⁸Antoine, IEEAC, est actuellement affecté au CENA à Toulouse.

en protégeant les auteurs originaux. Pour faciliter la diffusion, seuls des logiciels distribués avec cette même licence sont utilisés au sein du projet Paparazzi. À cause de ces choix, nous pensons que le projet Paparazzi peut constituer une plate-forme d'étude intéressante pour l'enseignement et la recherche. Précisons également qu'une telle licence ouverte n'interdit en rien l'utilisation des résultats dans un contexte industriel, civil ou militaire.

Malgré des investissements financiers faibles (fonds privés) et un développement rapide (moins de deux ans pour deux personnes, hors activités professionnelles), des avions équipés du système Paparazzi ont remporté deux compétitions de vol autonome en automne 2003 et juillet 2004, battant en particulier un drone développé et vendu par l'industriel EADS Dornier. Ces succès justifient l'approche utilisée et témoignent que le domaine des micro-drones, bien que largement étudié tant par les milieux académiques qu'industriels, est au stade du défrichage.

Ce document est divisé en deux parties. Dans un premier temps, nous donnons un rapide état de l'art dans le domaine du drone, ses applications civiles et la réglementation nécessaire correspondante. Dans un second temps, nous présentons le projet de micro-drone Paparazzi en détaillant ses composants, ses fonctionnalités et ses applications potentielles.

Nous concluons par quelques perspectives à court et à long terme dans le domaine.

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Les drones, avant tout militaires

Gros drones Depuis plus d'un demi-siècle, des drones ont été développés dans le domaine militaire. Après quelques expériences anecdotiques, ils ont été utilisés systématiquement lors des conflits «modernes», depuis les années 80, principalement par les israéliens et les américains, et par les forces alliées lors des deux guerres du Golfe. Ces engins ont notamment été utilisés pour des missions de reconnaissance et de surveillance (c.f. figure 1.1). Néanmoins certains (par exemple le Predator, figure 1.2) peuvent être armés, de missiles ou de mini-drones. Ces avions de plusieurs tonnes possèdent une charge utile importante (jusqu'à une tonne pour le Global Hawk) et sont équipés de caméras (visible et infrarouge) et de radars divers. Il sont reliés au sol via des communications haut-débit, habituellement via des satellites.



FIG. 1.1 – Drones militaires de surveillance : Global Hawk (Northrop Grumman, 1000kg de charge utile) et Sperwer (Sagem).

Le Global Hawk peut voler au-dessus du trafic civil (FL600) et son intégration à la



FIG. 1.2 – Le Predator, drone MAE multi-missions, utilisé par l'US Air Force depuis 1995.

circulation aérienne est délicate uniquement pendant les phases de montée et descente. À l'automne 2003, un Global Hawk a traversé l'atlantique pour une mission en Allemagne. Il semble difficile de savoir s'il a survolé l'espace aérien français ...

Drones portables La deuxième grande catégorie de drones ne se distingue pas par leur mission principale, l'observation, mais par leur taille. Ces drones portables (figure 1.3) de quelques kilogrammes sont conçus pour être transportés dans un sac à dos et mis en œuvre à l'aide d'une «station-sol» réduite à un ordinateur portable et un émetteur-récepteur permettant la communication avec le drone (les plus gros de ces mini-drones peuvent nécessiter l'usage d'une rampe de lancement pour le décollage). La charge utile essentielle d'un tel mini-drone est une caméra vidéo dont l'image est retransmise en continu à la station-sol. Avec un rayon d'action de quelques kilomètres, l'objectif d'un mini-drone est d'aller voir « de l'autre côté de la colline » soit en étant piloté comme un modèle-réduit standard soit de manière autonome en suivant une mission préprogrammée (une suite de *waypoints*), la navigation étant effectuée grâce à un positionnement GPS. Dans cette catégorie, le DO-MAV d'EADS-Dornier mesure 42cm d'envergure pour un poids de 500g. Il peut être mis en œuvre par un opérateur unique.

Micro-drones Toujours avec des objectifs au départ militaires, la miniaturisation des UAVs a été poursuivie. Pionnière dans le domaine dès les années 80 avec son *Pointer*, un avion de 4kg avec 1kg de charge utile, la société AeroVironment a construit un drone de 42g, le Black Widow (figure 1.4) équipé d'une caméra et capable de naviguer de manière autonome (GPS) avec une autonomie de 30mn. Mis à part la performance technologique, on peut douter de l'intérêt d'une telle miniaturisation qui d'une part réduit la charge utile à quelques grammes et dont les performances de vol sont forcément très dégradées en présence de vent.



FIG. 1.3 – Drones portables : Evolution (BAI Aerosystem) et DO-MAV (EADS-Dornier).

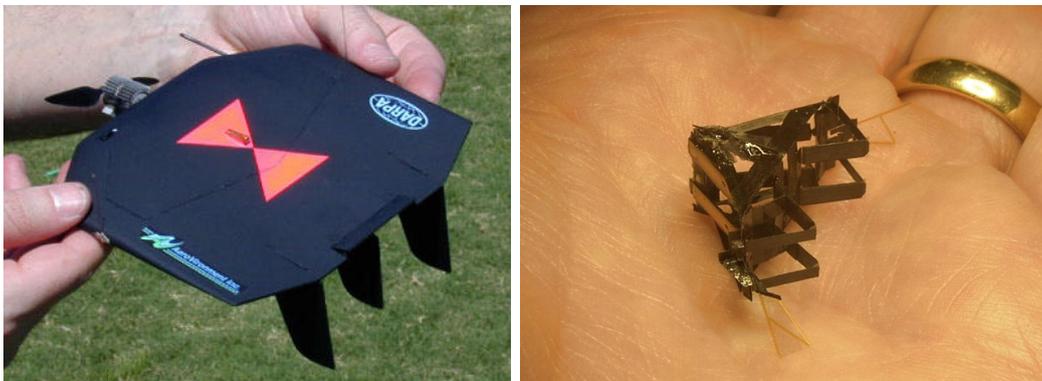


FIG. 1.4 – Micro drones : Black Widow (Aerovironment, 42g) et Micromechanical Flying Insect (UC Berkeley, 25mm)

La course à la miniaturisation est cependant loin d'être terminée et les études actuelles concernent des engins de quelques grammes (figure 1.4) ; dans ce cadre les recherches s'orientent vers des solutions s'inspirant du monde biologique en particulier pour l'aérodynamique en privilégiant le vol à ailes battantes. Le vol à ailes battantes ou vibrantes est étudié au sein du projet REMANTA de l'ONERA : les problèmes à résoudre sont mécaniques et aérodynamiques. Les écoulements induits par les mouvements complexes doivent être analysés finement afin de pouvoir optimiser le rendement du vol. Les autres problèmes à résoudre à ces échelles concernent la propulsion et l'énergie.

L'intérêt militaire des micro-drones a été identifié depuis plusieurs années et la lecture du rapport [6] est aussi enrichissante qu'inquiétante.

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



FIG. 1.5 – Drone solaire Helios (www.aerovironment.com)

avec son drone Helios (anciennement Pathfinder). Il s'agit d'un grand avion électrique (figure 1.5) d'une soixantaine de mètres d'envergure, muni de panneaux solaires et d'une pile à combustible. L'énergie solaire est utilisée pendant la période diurne pour alimenter les moteurs et recharger la pile à combustible. Cette dernière est utilisée la nuit pour éviter à l'avion de perdre trop d'altitude. En 2001, Helios a atteint une altitude record de 96 863 pieds. Des expérimentations ont été effectuées en 2002 avec ce drone pour la première application commerciale (de la télévision) utilisant un relais à 60 000 pieds¹.

Drones hélicoptères De même qu'avec les aéronefs pilotés, certaines applications nécessitent la possibilité de pouvoir effectuer du vol stationnaire. Plusieurs solutions sont envisagées, la moins originale est l'hélicoptère classique. Les hélicoptères R-50 et RMAX de Yamaha sont commercialisés depuis plus d'une douzaine d'années. Il s'agit d'engins d'une cinquantaine de kilos avec une charge utile de 20 et 30kg. Munis d'un système de navigation, ils sont capables d'effectuer des missions en autonomie complète. Aujourd'hui, plus de 1500 exemplaires sont utilisés au Japon pour des traitements agricoles [10]. Le RMAX a aussi été capable de réaliser des prises de vues aériennes en environnement hostile lors d'une éruption volcanique. Un exemplaire d'un RMAX capable de voler de façon autonome jusqu'à 100m au dessus du sol est commercialisé à \$200 000. Au Japon, son utilisation agricole doit être certifiée par le *Japan Agriculture Aviation Association* qui assure également la formation des opérateurs.

L'autre solution technique classique pour effectuer du vol stationnaire avec un engin de petite taille est le quadrirotor (figure 1.6) : l'aéronef est sustenté par quatre rotors indépendants disposés en croix. Le contrôle est assuré simplement par la variation de la vitesse de rotation de chacun des rotors. Cette solution est mécaniquement plus simple qu'un hélicoptère classique (rotor à pas variable), naturellement plus stable mais moins dynamique (réaction lente aux perturbations extérieures). Le quadrirotor est par exemple étudié par le CEA pour un engin d'exploration intérieure pour les centrales nucléaires[9].

¹Un exemplaire d'Helios s'est écrasé en juin 2003 au large d'Hawaï pendant un vol d'essai.



FIG. 1.6 – RMAX Yamaha et quadrirotor Braunmod

Dans cette application, le drone doit «apprendre» son itinéraire à l'aide d'«indices vidéo», pour savoir ressortir du bâtiment de manière autonome.

Drones européens Bien qu'en retrait dans le domaine militaire (derrière Israël et les USA), l'Europe est active tant du côté académique qu'industriel sans oublier le domaine réglementaire. L'université technique de Braunschweig, Allemagne constitue un pôle de recherche important. L'université de Bristol, UK, a organisé en 2004 la 18ème conférence internationale sur les UAV (anciennement *Remotely Piloted Vehicles*). L'ENSICA et Supaéro organisent depuis 2001 les Journées Micro-drones, regroupant une conférence et des démonstrations en vol.

Ces journées sont en relation avec le concours de drones miniatures supervisé par la DGA. Ce concours dont l'épreuve finale aura lieu en 2005 est ouvert aux écoles d'ingénieurs et aux universités. Selon le règlement, « ce concours a pour objet de démontrer la faisabilité technique et l'intérêt opérationnel des drones miniatures utilisés comme aide au fantassin dans sa progression en milieu hostile ». L'objectif ultime est la circulation autonome dans un milieu urbain d'un engin muni d'une caméra, avec pour mission de repérer des *snipers*. Les critères d'évaluations comprennent la simplicité de mise en œuvre, l'endurance, la miniaturisation, la discrétion, ...

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

Références La description de l'ensemble des drones existant est disponible sur le web. On peut citer www.uavforum.com qui répertorie les constructeurs et les aéronefs. La revue Armada Internationale a publié en juillet 2004 un «guide complet des UAV» disponible à www.aramada.ch. Le site www.livingroom.org.au/uavblog relate régulièrement les nou-

velles du domaine.

Les industriels se sont regroupés au sein d'un consortium UVS International (initialement EURO UVS) afin de promouvoir l'utilisation des drones. Les objectifs du consortium sont

- d'avoir un impact international ;
- d'être un canal de communication privilégié pour les différents acteurs du secteur : industries, gouvernements, autorités de l'aviation civile, universitaires, militaires, opérateurs, ... ;
- de constituer une aide à l'étude du marché du drone ;
- de montrer aux utilisateurs potentiels l'intérêt des drones ;
- de promouvoir la coopération industrielle internationale ;
- d'améliorer la visibilité de la technologie vis à vis du grand public.

Le site du consortium www.uvs-international.org (libre d'accès après inscription), contient une base de donnée importante de documents concernant les constructeurs, les aéronefs et les événements internationaux dans le domaine. Le consortium organise aussi régulièrement des conférences internationales.

1.2 Applications civiles

Nous présentons ici dans un premier temps les applications par catégories et nous en détaillons ensuite quelques unes. Certaines d'entre elles ne sont pas compatibles avec la régulation actuelle de la circulation aérienne ; nous nous intéressons à ce point uniquement dans la section suivante.

1.2.1 Application selon masse et altitude

Tous les avantages reconnus des drones pour les applications militaires sont transposables aux applications civiles : comme mentionné dans l'introduction, les environnements «Dull, Dirty and Dangerous» peuvent se rencontrer dans le domaine civil. Des missions civiles très similaires aux missions de défense comme la surveillance des frontières² et la surveillances des personnes (lors de manifestations publiques par exemple ou lors de simples missions de police) sont facilement envisageables. D'autres applications, plus originales, sont étudiées à plus ou moins long terme : observation de la terre, télécommunications, transport, ...

Le projet européen USICO (les objectifs de ce projet sont présentés dans la section 1.3.2) a identifié trois grandes catégories de drones candidats à des applications civiles [14] et analysé le marché comme représenté figure 1.7 :

1. Mini et micro-drones à basse altitude :
 - Photos aériennes, inspection

²Des drones de l'armée suisse ont par exemple été utilisés pour surveiller les frontières dans le Tessin pendant l'été 2004. Des drones Hermes surveillent la frontière entre le Mexique et les USA depuis fin juin 2004.

- Publicité
- Épandage agricole, surveillance des cultures, garde de troupeaux
- Expériences scientifiques, mesures atmosphériques
- Déminage

L'évolution de cette branche sera fortement liée à l'évolution de la technologie correspondante. Envisagée uniquement dans le cadre des règles actuelles de l'aéro-modélisme, l'utilisation des mini-drones est cependant assez limitée, notamment à cause de l'obligation de pilotage «à vue».

2. MALE :

- Activités gouvernementales (police, douanes, environnement, ...)
- Missions scientifiques
- Surveillance d'infrastructures (réseau routier, lignes électriques, pipe-lines, ...)
- Géodésie
- Transport de fret
- Transport de passagers

Les drones de cette catégories sont sur le marché (militaire) mais ne peuvent pas être intégrés au trafic civil. Notons que l'usage de ce genre de plate-forme est limité par le traité de non prolifération³

3. HALE géostationnaire :

- Radiodiffusion (télévision, ...)
- Télécommunications mobiles
- Environnement (incendies, pollution maritime, ...)

Mis à part le prototype Helios (figure 1.5), il n'existe actuellement pas de plate-forme pouvant assurer ces missions (les autres projets envisagent des gros dirigeables). Cependant, ces services correspondent à un marché important, ce qui pourrait entraîner une évolution rapide du domaine.

1.2.2 Quelques applications concrètes

Publicité et photo aérienne L'une des rares applications actuelles civiles d'un aéronef non habité concerne l'usage d'un ballon captif simplement comme support publicitaire ou pour réaliser de la photo aérienne : le ballon est muni d'un appareil photo orientable, télécommandé depuis le sol ; une caméra vidéo dont l'image est retransmise au sol sert de viseur. Le ballon peut évoluer jusqu'à 150m, dans le cadre de la réglementation des aéro-modèles. De nombreuses sociétés, en particulier françaises (Photociel, Phodia, ...), proposent des services basés sur cette technique. La société Mediazepp commercialise un ballon équipé pour moins de 5000€, prix à comparer avec une solution classique hélicoptère et pilote ... Pour cette même application, le drone paramoteur⁴ Pixy a également été

³Régime de Contrôle de la Technologie des Missiles : ce traité régle l'exportation de matériel et logiciel permettant le développement de missiles d'une charge utile supérieure à 500kg et d'un rayon d'action de plus de 300km.

⁴Un paramoteur est un aéronef motorisé sustenté par une voile souple, de type parachute.

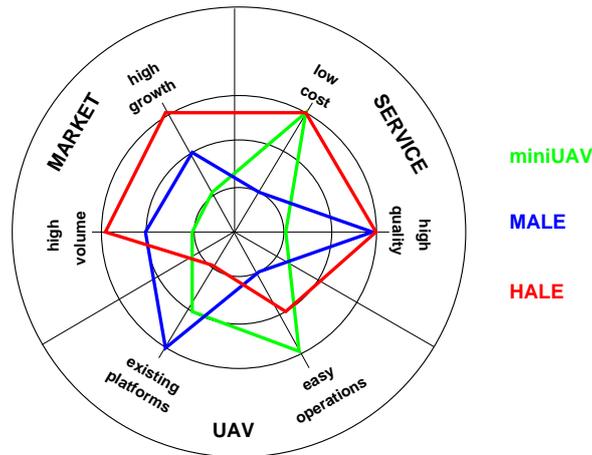


FIG. 1.7 – Analyse du marché du drone civil selon l'USICO

développé. L'avantage par rapport au ballon captif, tout en restant dans le même cadre de réglementation, est sa mobilité. De plus, son pilotage, grâce à une vitesse d'évolution faible, ne nécessite pas les talents d'un pilote chevronné.

Déminage Les mines antipersonnel peuvent être repérées dans certaines conditions depuis le ciel : enfouies à très faible profondeur, à l'aube, elles ne se réchauffent pas de manière identique au terrain environnant et il est possible de les repérer avec une image infrarouge. Une cartographie de terrains minés a déjà été réalisé avec un mini-drone hélicoptère de quelques dizaines de kilogrammes⁵.

La technologie hélicoptère est assez coûteuse mais il est possible d'utiliser un mini-drone avion pour réaliser cette cartographie. La société Fondmetal Technologie envisage d'utiliser le système Paparazzi pour équiper un avion de quelques kilogrammes dans ce but. L'objectif est de fabriquer un engin d'environ 15 000€ qui serait accessible aux organisations humanitaires et aux pays en voie de développement. Des expérimentations sont en cours.

Feux de forêt La lutte contre les feux de forêt est d'autant plus aisée que la détection de départ de feu est précoce. Une surveillance permanente nécessite des moyens humains importants. La solution drone s'impose naturellement⁶. Pour ne pas interférer avec la circulation aérienne, c'est un drone HALE qui est prévu. À 20 000m d'altitude, avec une autonomie de 24h, le drone sera muni de capteurs optiques et électromagnétiques pour détecter non seulement les feux mais également les véhicules dans les zones réglementées. Le programme de recherche piloté par l'ONERA doit donner ses conclusions fin 2004.

⁵maic.jmu.edu/journal/3.2/focus/schiebel_mad/schiebel.htm

⁶www.onera.fr/coupdezoom/07-drone-feux-forets.html

Inspection d'infrastructure Les mini-drones sont étudiés sérieusement pour inspecter des infrastructures, en particulier des lignes haute tension et des ouvrages d'art. Le projet RIPL (*Robotic Inspection of Power Lines*) développe un mini-hélicoptère de 35kg à deux rotors coaxiaux contra-rotatifs. L'étude du marché potentiel [1] devrait être motivante pour la recherche dans le domaine. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées conduit un projet pour l'utilisation de drones dont la mission est la surveillance automatisée d'ouvrages d'art[4]. Des expérimentations ont été conduites dès 2001 sur un viaduc, en zone urbaine, avec un hélicoptère de 10kg radio-commandé (non autonome). Ce même laboratoire étudie également l'utilisation de drones pour la surveillance du trafic routier[11]. L'objectif vise à mesurer précisément les phénomènes de congestion chronique (sur les périphériques des grandes agglomérations) ou exceptionnelle (sur les autoroutes suite à un incident bloquant la circulation par exemple). Dans le second cas de figure, l'idée est d'avoir un système portable dont la mise en œuvre serait très simple (quelques minutes) afin d'obtenir rapidement des observations sur site à moindre coût ; c'est donc encore la catégorie des mini-drones qui est candidate à cet usage. Une expérimentation a été envisagée au dessus du périphérique de Nantes mais aucune autorisation de vol n'a pue être obtenue (la réglementation pour l'aéro-modélisme ne s'appliquant pas dans ce cas).

Mesures atmosphériques Les ballons sondes, utilisés depuis longtemps par la météorologie, ne sont pas à proprement parler des drones puisqu'ils ne sont pas pilotés (ni récupérés en général). Il est assez tentant de remplacer ces ballons par des aéronefs contrôlés. Il est cependant délicat d'envisager d'autres engins car les mesures doivent pouvoir être effectuées dans des conditions délicates (nuage, givrage, très haute altitude, ...) et surtout suivant un profil vertical. Un drone pourrait être intéressant dans trois contextes :

1. Récupération d'un ballon sonde traditionnel : le ballon est largué à haute altitude et l'équipement de mesure redescend en planant de manière autonome vers un site de réception. Le principal problème reste alors l'intégration de la trajectoire descendante à la circulation aérienne.
2. Campagne de mesures intensives[8] : la campagne Thorpex (The Hemispheric Observing System Research and Predictability Experiment) envisage de lancer des ballons dirigeables à haute altitude (20 000m) emportant une charge utile de *dropsondes* larguées par télécommande. Prévu pour une durée de vie d'un an, un tel ballon peut être qualifié de drone ... Est prévu également l'utilisation d'*aerosondes*⁷, un drone d'une quinzaine de kilogrammes qui a déjà fait ses preuves, notamment en traversant l'atlantique.
3. Mesure en basses couches : un mini-drone est particulièrement bien adapté pour effectuer des mesures à basse altitude. Ainsi, un Carolo T140⁸, renommé M²AV, Meteorological MAV pour l'occasion, va être utilisé pour effectuer des mesures de température, humidité et vent[3].

⁷www.aerosonde.com

⁸Il s'agit du Tinstar Multiplex de 1.40m, la cellule choisie au sein du projet Paparazzi depuis début 2003.

1.3 Réglementation

Les applications civiles des drones sont nombreuses mais beaucoup d'entre elles sont impossibles par manque de réglementation les concernant. Les avions sans pilote étaient déjà mentionnés dans la convention de Chicago (1944), article 8 :

No aircraft capable of being flown without a pilot shall be flown without a pilot over the territory of a contracting State without special authorization by that State and in accordance with the terms of such authorization. Each contracting State undertakes to insure that the flight of such aircraft without a pilot in regions open to civil aircraft shall be so controlled as to obviate danger to civil aircraft.

et 60 ans plus tard, nous en sommes toujours au stade des « autorisations spéciales ». Par exemple, à l'occasion des cérémonies commémoratives du 60^e anniversaire du débarquement en Normandie en juin 2004, un drone de surveillance a été utilisé et une zone particulière a dû lui être réservée⁹ :

Lorsque le drone évolue dans la zone, la tranche d'altitude entre les niveaux de vol 075 et 105 sera exclusivement réservée à son usage.

La réglementation actuelle n'est pas adaptable aux drones pour différentes raisons essentielles. Principalement

- le « voir & éviter » à la base de la circulation aérienne est liée à la présence du pilote dans l'aéronef ;
- la notion de panne « catastrophique » en navigabilité est uniquement liée à la perte de l'aéronef et aux victimes à bord, sans prendre en compte les victimes potentielles au sol.

Depuis quelques années, plusieurs groupes de travail ont réfléchi à ces questions, notamment en Europe. Nous donnons un résumé des conclusions d'USICO et du *JAA/Eurocontrol UAV Task Force*. Les mini-drones jouant un rôle particulièrement important (en proportion au moins d'après le *JAA/Eurocontrol UAV TF*), nous commençons par rappeler la réglementation actuelle concernant l'aéro-modélisme.

1.3.1 L'aéro-modélisme

En France, toute activité d'aéro-modélisme est réglementée par la DGAC. Elle est réglementée par un arrêté du 25 août 1986 qui stipule qu'un aéro-modèle est un « objet volant radiocommandé ou non, motorisé ou non, sans pilote, ni personne à bord ».

Les aéro-modèles sont classés en 3 catégories principales :

Catégorie 1 : aéro-modèles de masse inférieure ou égale à 12 kg et dont le (les) moteur(s) a (ont) une cylindrée totale inférieure ou égale à 50 cm³. Cette catégorie ne nécessite pas d'autorisation spéciale.

⁹Arrêté du 17 mai 2004 portant création de zones interdites temporaires dans la région de Caen (Calvados), Journal Officiel du 27 mai 2004.

Catégorie 2 : aéro-modèles de masse inférieure à 25 kg et n'appartenant pas à la catégorie 1. Une déclaration auprès du district aéronautique est obligatoire pour cette catégorie.

Catégorie 3 : aéro-modèles de masse supérieure à 25 kg. Une autorisation de vol accordée par la DGAC est obligatoire. Cette autorisation est attribuée au couple aéronef-pilote au regard d'un dossier décrivant l'aéro-modèle, après inspection de l'aéro-modèle ainsi qu'une épreuve de vol.

Le vol des aéro-modèles est autorisé en dehors des servitudes aéronautiques et radio-électriques des aérodromes, à distance des habitations et des routes, ... Les aéro-modèles ne doivent pas interférer avec les aéronefs, en particulier ne pas voler au-dessus de 150m. Le pilotage s'effectue à vue. Les fréquences et les puissances des radio-commandes sont régulées par l'Agence Nationale des Fréquences. Les terrains d'aéro-modélisme sont homologués par le District Aéronautiques et sont gérés par la Fédération Française d'Aéro-Modélisme.

1.3.2 L'USICO

Le projet européen USICO¹⁰ (mai 2002, avril 2004) est un consortium d'entreprises et de centres de recherche européens. Dans l'intention d'accélérer le développement du marché des UAVs civils, les principaux objectifs du projet étaient :

- identifier les exigences des missions commerciales des UAVs (*Work Package 1*) ;
- définir des règles et procédures pour la certification opérationnelle (WP3) et de navigabilité (WP2) ;
- développer des concepts et les simuler pour l'intégration des UAVs dans l'espace aérien civil (WP4) ;
- disséminer les résultats à la communauté (WP5).

L'USICO a énoncé quelques grands principes de base pour cadrer les études :

- Risque : la circulation d'un drone ne doit pas augmenter les risques des autres usagers du même espace aérien ni contraindre leurs trajectoires.
- Conformité : les standards de navigabilité pour les drones doivent être similaires à ceux des aéronefs pilotés.
- Opérations : les drones doivent s'intégrer à la circulation aérienne existante (i.e. sans la modifier)¹¹.

Concernant la navigabilité, le consortium ne semble avoir abouti à aucune conclusion constructive (les comptes-rendus parlent de statu quo). En revanche, concernant les opérations, le travail a été plus productif.

Opérations (WP3) L'intégration d'un drone dans l'environnement ATC/ATM met en jeu (figure 1.8) :

¹⁰La communauté européenne supporte deux autres projets concernant les applications civiles des drones : UAVNET et CAPECON (Civil UAV Applications & Economic effectivity of potential CONfiguration solutions). Ces deux projets s'intéressent très peu aux aspects réglementaires.

¹¹Dans ce cadre, on peut citer le travail d'un élève IENAC à l'ONERA [12] qui a tenté de formaliser certains aspects de la réglementation afin d'y identifier plus facilement les incompatibilités avec les drones.

- l’aéronef lui-même, avec des moyens de communication, de navigation et d’évitement (ACAS **et** voir&éviter¹²);
- une station-sol de pilotage reliée au drone par un lien bi-directionnel, direct ou via un relais (satellite);
- les organismes ATC, reliés au drone par datalink et à la station-sol par un lien terrestre.

Cette solution ne révolutionne donc pas le système ATM/ATC actuel. En particulier, il n’est pas envisagé :

- que le drone soit totalement autonome en vol (avec de la reconnaissance et de la synthèse vocale pour les communications avec l’ATC par exemple) : le rôle et les responsabilités du pilote au sol sont les mêmes que pour un aéronef standard ;
- que le drone soit piloté directement par l’ATC : les clairances ne sont jamais considérées comme des commandes (cela pourrait être utile lorsque la communication entre le drone et la station est rompue mais que le datalink entre le drone et l’ATC est toujours actif).

Les spécificités du vol du drone sont donc réduites à :

- une signalisation particulière qui permet à un pilote d’aéronef de l’identifier et de le distinguer d’un aéronef piloté ;
- des procédures d’urgence adaptées.

Certaines procédures d’urgence existantes pour les vols IFR doivent pouvoir s’appliquer directement aux drones (perte de communication ou perte de puissance par exemple). Cependant il est suggéré que le drone puisse quitter l’espace aérien contrôlé le plus vite possible. Des codes transpondeur spécifiques aux décisions d’un drone (poursuite de la mission, retour à la maison, ...) sont proposés. Une communication directe (téléphone) entre contrôleur et pilote semble être cruciale pour compléter ces procédures.

Simulation de contrôle (WP5) Des expérimentations consistant à intégrer des drones dans du trafic normal ont été menées sur simulateur. Les objectifs étaient d’évaluer le concept en situation normale et dégradée (perte du datalink, perte de puissance, ...). Mis à part les problèmes liés aux performances (e.g. taux de montée faible) des drones, les contrôleurs n’ont pas eu de problèmes particuliers pour réaliser l’intégration, et ce malgré une latence (3s) introduite dans les communications avec les pilotes des drones. En cas de perte du datalink, la communication directe possible via le téléphone a même été considérée comme un avantage par rapport au cas des aéronefs pilotés.

1.3.3 Les propositions du *JAA/Eurocontrol UAV Task Force*

Le groupe *JAA/Eurocontrol UAV Task Force* (UAV T-F) a été créé en septembre 2002 pour répondre aux attentes en terme de réglementations de l’industrie européenne du drone. Le groupe a rendu son rapport final début 2004 (draft 4 en janvier) intitulé *A concept for*

¹²Les premiers standards pour les systèmes voir&éviter viennent d’être publiés par ASTM International : *F2411-04 Standard Specification for Design and Performance of an Airborne Sense-and-Avoid System*

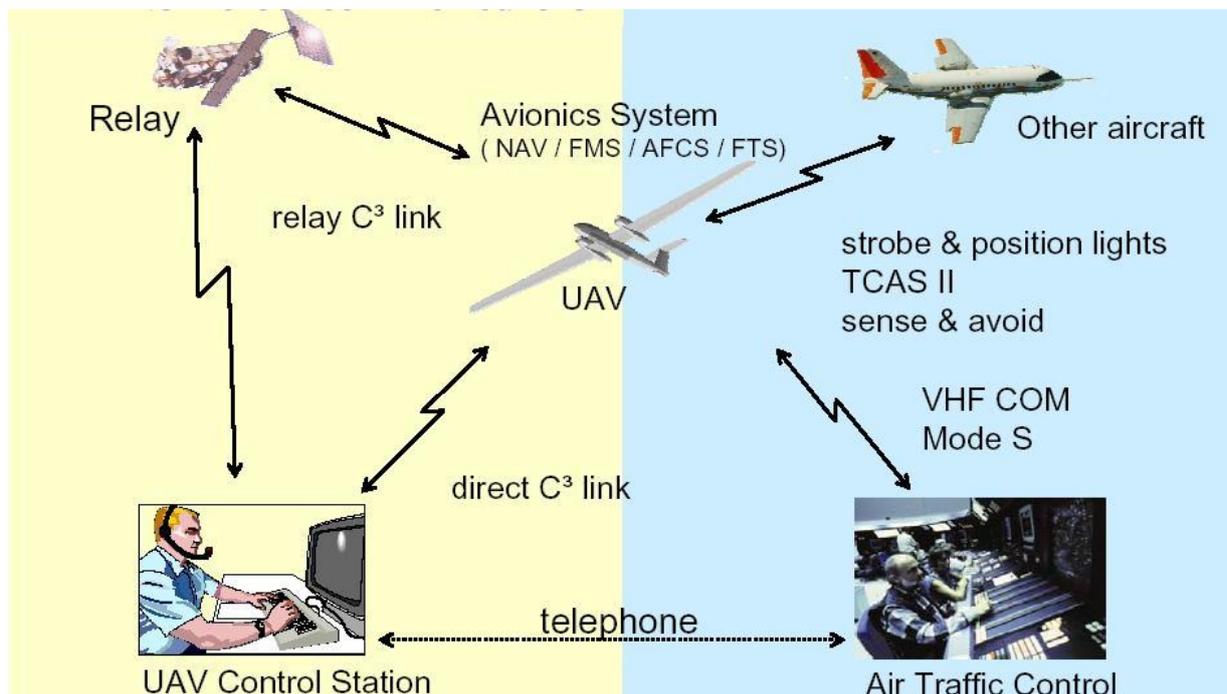


FIG. 1.8 – Circulation aérienne d'un drone

European regulations for civil UAV. Le titre parle de lui-même : il s'agit d'un tout premier pas vers une réglementation européenne et ce document ne constitue qu'un ensemble de recommandations.

Le groupe de travail a identifié l'existant (plus de 440 drones commercialisés de par monde), les applications civiles (annexe 1.2, énumérées dans la section précédente) et le manque d'harmonisation des autorités nationales de régulation dans le domaine du trafic civil des drones. L'ensemble de ses recommandations ne concerne pas les missions militaires, de douanes ou de police ni les drones légers (moins de 150kg). Ces derniers doivent être réglementés au niveau national mais le JAA T-F recommande de suivre ses propositions (annexe 1).

Comme l'USICO, le JAA T-F s'est fixé quelques grands principes pour guider ses études :

- Équité : la réglementation des drones doit suivre autant que faire se peut la réglementation des aéronefs standards.
- Équivalence : la réglementation ne doit pas être plus ni moins exigeante que celle concernant les aéronefs pilotés :
 - Risque : les vols de drones ne doivent pas augmenter les risques des autres usagers de l'espace aérien.
 - Opérations : les opérateurs de drones doivent s'adapter à la situation actuelle.
- Responsabilités : elles doivent être aussi claires que pour les avions pilotés (e.g. opérateur vs commandant)
- Transparence : les services fournis aux drones par l'ATC sont les mêmes que pour les

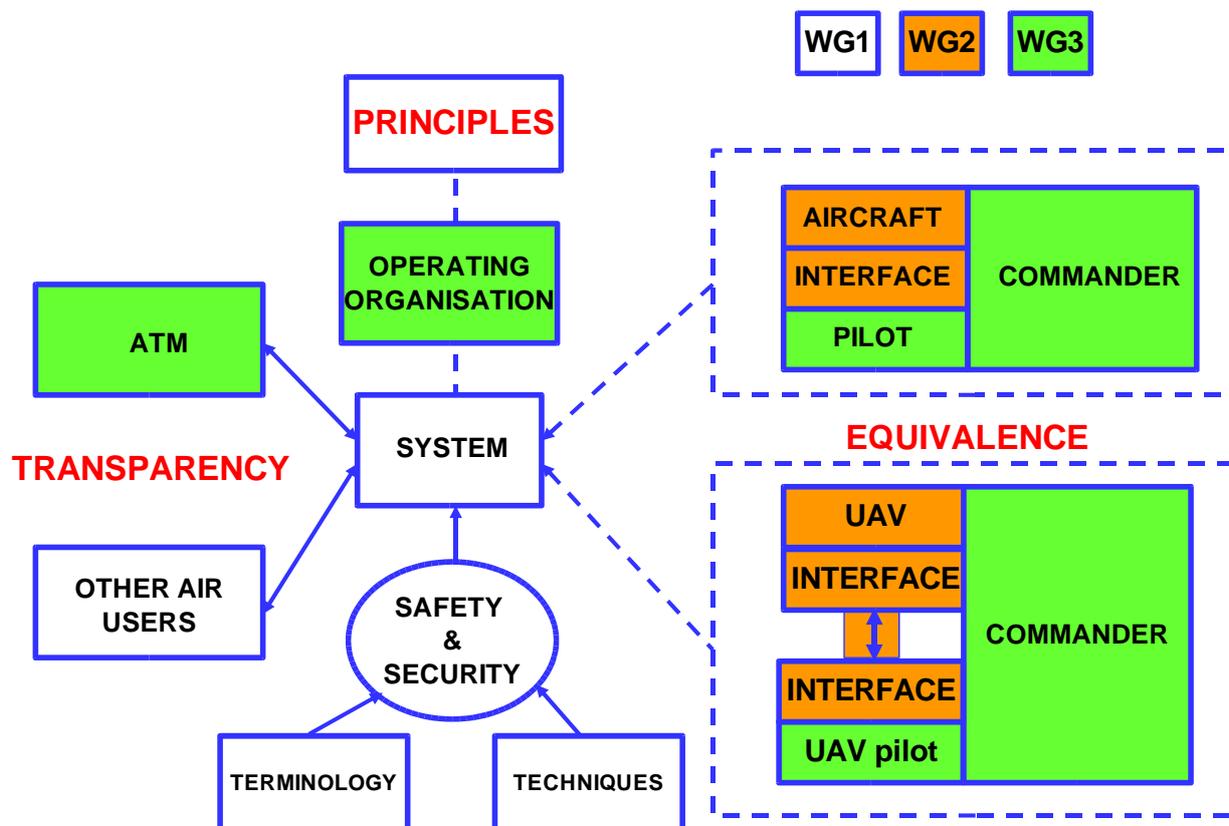


FIG. 1.9 – JAA T-F : approche *systèmes*

autres utilisateurs (en particulier avec une communication par radio).

On voit que le JAA T-F est extrêmement conservateur et son but consiste vraiment à **intégrer** les drones dans le système actuel.

Le travail du JAA T-F a été divisé en trois *Working Group* (figure 1.9) :

WG1 Généralités, sûreté et sécurité

WG2 Navigabilité

WG3 Opération, maintenance et licences

Avant de donner les conclusions de ces groupes de travail, nous nous intéressons au cas des drones légers qui sont ceux susceptibles de pouvoir voler dans un avenir très proche.

1.3.3.1 Les drones légers

L'annexe 3.1, *UAV Categorisation*, du JAA T-F répertorie aujourd'hui 255 drones (dont 195 militaires) de moins de 150kg sur un total de 440 (dont 339 militaires). Même si la réglementation des drones légers est laissée aux états, leur importance a conduit le JAA T-F à produire des recommandations générales les concernant (annexe 1).

La différence essentielle entre un aéro-modèle et un drone est que le premier est un jouet alors que le second est exploité commercialement. Cependant, considérant

- d’une part que les drones légers ont des caractéristiques analogues aux aéro-modèles ;
- d’autre part que de nombreux aéro-modèles volent depuis de nombreuses années avec un niveau de sûreté satisfaisant ;

les drones légers doivent pouvoir être mis en œuvre sans certification de navigabilité. Ajouté au fait que le vol des drones légers est envisagé dans un espace aérien sans autres aéronefs, la mise en œuvre devient *simple*.

le JAA T-F détaille ses recommandations comme suit (extraits choisis) :

- Un drone léger est un aéronef non piloté de moins de 150kg, volant à moins de 70kt avec une énergie de moins de 95kJ¹³.
- Certification
 - Un drone léger ne nécessite pas de certificat de navigabilité. Cependant la conception, la construction et les premiers tests en vols doivent être contrôlés par les autorités nationales de l’aviation civile.
 - Le pilote d’un drone léger n’a pas besoin de licence. Il doit cependant être identifié et montrer ses capacités à contrôler le drone.
 - Un drone léger n’est pas immatriculé.
- Règles de vol
 - Un drone léger doit rester en vue du pilote.
 - Un drone léger ne peut pas voler la nuit.
 - Un drone léger ne vole pas au-dessus de 400ft.
 - Un drone léger doit voler à au moins 150m d’une ville, 100m d’une personne, ...
 - Un drone léger doit disposer d’un système d’interruption de vol.

On remarque donc que les recommandations du JAA T-F ne considèrent qu’une catégorie de drone léger, de 0 à 150kg (contrairement à la réglementation française, c.f. 1.3.1).

1.3.3.2 Navigabilité et certification (WP2)

L’approche utilisée aujourd’hui pour la certification des aéronefs civils est basée sur un ensemble de règles d’exigences de navigabilité, fondées sur l’expérience, à appliquer à la conception de n’importe quel aéronef. Cela conduit à délivrer des qualifications de type et des certificats de navigabilité, indépendamment de la mission qui est prévue pour l’aéronef. Pour les drones, à l’opposé de cette approche globale, on peut envisager une approche au « cas par cas » (*safety target*) où la certification est donnée à un aéronef donné, pour une mission donnée, dans un environnement donné. L’avantage est que la certification se focalise alors sur l’évaluation des risques clés sans devoir prendre en compte des considérations générales non nécessairement pertinentes pour la mission envisagée.

Après analyse, le JAA T-F ne retient finalement pas cette seconde approche et recommande de conserver les procédures de l’aviation civile traditionnelle tout en mentionnant deux exceptions, le cas des drones légers et la possibilité de délivrer des certificats de navigabilité restreints, par exemples pour des missions de drones dans des espaces isolés.

¹³Définition de l’énergie :Maximum de $\frac{1}{2}m(1.4 v)^2$ et de l’énergie cinétique résultant d’une chute libre de 400ft.

En plus des aspects pertinents pour les aéronefs traditionnels, le certificat de navigabilité devra s'intéresser aux points spécifiques suivant :

- sûreté des moyens de communication du drone et leurs résistances à des perturbations extérieures (foudre, interférences, ...);
- sûreté de la conception et de la réalisation de la station sol;
- facteurs humains relatifs à la station de contrôle;
- sûreté des systèmes d'interruption de vol.

De même, la certification de type devra considérer :

- les capacités de réaction aux situations d'urgence;
- l'autonomie;
- les liens de communications;
- les interfaces homme-machine.

De même que pour l'aviation commerciale (JAR-25-1309), le critère d'évaluation sera basé la notion de risque, produit de la gravité d'un événement par sa probabilité d'occurrence. Le transport de passagers n'étant pas envisagé par le JAA T-F, la sûreté concerne essentiellement les personnes au sol. Cinq niveaux de gravité sont retenus, le plus grave, un événement catastrophique, correspondant à l'impossibilité pour le drone de poursuivre son vol et d'atterrir sur un site prédéfini, i.e. un crash non contrôlé avec des victimes potentielles au sol. L'objectif de sûreté est alors de réduire la probabilité d'un événement catastrophique à un niveau comparable à celle existant pour un aéronef piloté de même catégorie.

1.3.3.3 Opérations, maintenance et licences (WP3)

Encore une fois, la philosophie est de rester le plus proche possible des règles et procédures existantes. Il sera donc nécessaire de savoir délivrer des licences aux «équipages» (station sol), aux opérateurs, aux techniciens chargés de la maintenance des drones. Pour les opérations, il est conseillé de s'inspirer directement des JAR-OPS 1 bien que ces derniers ne s'appliquent aujourd'hui qu'au transport commercial civil et non au travail aérien (pour lequel les drones seront adaptés). De même pour la maintenance, il s'agit simplement de suivre la réglementation actuelle (JAR 145, 147 et 66)

1.3.3.4 Travail à venir

Le JAA T-F a listé un certain de nombres de priorités et les acteurs correspondant pour le travail à venir :

Sécurité (EASA, OACI, états) : communications, station sol, usage détourné d'un drone civil par un terroriste;

Certification (EASA, ITU, OACI) : production d'un document destiné aux constructeurs pouvant leur servir de base pour la certification des drones.

Exploitation – (EASA, OCAI, CE) : aspects légaux;

- (EASA, EUROCONTROL, industriels) : définition des équipements nécessaires à bord d'un drone;

- (industriels) : procédures pour la circulation sur les plate-formes aéro-portuaires ;
- (EASA) : licence des pilotes (au sol) de drone.

1.3.3.5 Commentaires

Les travaux de l'USICO et du JAA T-F sont préliminaires et peu constructifs. Ils ont le mérite d'avoir identifié ce qu'il faut faire du point de vue réglementation pour pouvoir intégrer des drones dans l'espace aérien civil. Le rapport du JAA-TF peut donc être considéré comme un cahier des charges pour les années à venir.

On peut s'étonner de la faible implication apparente de la DGAC (et des autres autorités nationales) dans ce processus. Le mot «drone» n'apparaît pas¹⁴ sur le site www.dgac.fr. Nos interrogations sont restées sans réponses auprès de l'ENAC et même de la DNA, le seul spécialiste désigné étant Philippe Bataillé (un des initiateurs du projet Paparazzi) qui a longtemps été responsable de la certification des gros aéro-modèles et qui a participé au JAR T-F. Espérons qu'il s'agit seulement d'un problème de communication.

À l'opposé, on ne peut qu'être surpris par le «rêve» des constructeurs et des utilisateurs de faire voler des drones dans l'espace aérien civil. Ce rêve ne pourra pas devenir réalité à court terme faute de réglementation (sauf dans une certaine mesure pour les drones légers). Dans ces conditions, on ne peut que s'étonner de l'activité intense de projets européens comme CAPECON ou UAVNET qui ne s'intéressent qu'aux applications civiles sans se soucier de leur faisabilité.

Vol en patrouille La perte du lien de commande entre le pilote et l'aéronef est catastrophique pour un drone. Pour cette raison, le vol en patrouille avec un aéronef piloté accompagné de drones est envisagé pour certaines applications (e.g. transport de fret). On peut remarquer que, du point de vue de l'ATC, ce genre de formation est prévu par la réglementation actuelle. L'article 5 de l'arrêté du 18 mars 1982 stipule que

Une formation d'aéronefs en vol contrôlé constitue un seul mouvement quand elle est capable d'évoluer en disposition ordonnée dans un espace maximal horizontal de 1,852 km (1 NM) et vertical de 30 m (100 pieds) de part et d'autre du niveau de vol choisi et d'exécuter sans dissociation les clairances éventuelles des organismes du contrôle de la circulation aérienne.

Catégories des drones légers Il est relativement surprenant que le JAA T-F ne propose qu'une seule catégorie de drone léger. Pour différentes raisons :

- il n'est pas très réaliste d'envisager des applications d'engins volant à 70kt contrôlés à vue depuis le sol ;
- les conséquences d'un crash d'un engin d'1kg et d'un engin de 150kg sont incomparables.

¹⁴La seule occurrence d'après les moteurs de recherche concerne la préparation de la prochaine conférence mondiale de radiocommunication qui devra attribuer des fréquences réservées pour les canaux de commande des drones.

Il semblerait préférable de s'inspirer de la réglementation française qui demande une certification en fonction de la masse. De plus, des applications sérieuses nécessiteront la possibilité de voler de manière autonome sans contrôle visuel du pilote. Ceci est parfaitement envisageable pour des mini-drones volant lentement (énergie cinétique faible), la probabilité d'occurrence d'un événement catastrophique étant très petite (même avec une probabilité de crash élevée).

Chapitre 2

Le projet Paparazzi

Initié début 2003¹, le projet Paparazzi a pour objectif le développement d'un mini-drone à bas coût. Il s'agit d'un projet privé, mené conjointement avec Antoine Drouin, pour lequel ont été développés du *hardware* (système embarqué) et du *software* (système embarqué, station sol, outils de développement). Le système obtenu permet de faire voler de façon autonome un avion modèle réduit.

Nous décrivons dans ce chapitre l'historique du développement, les différents composants du système dans son état actuel et son utilisation. Nous concluons par quelques perspectives, en particulier par l'évolution possible du projet en une activité fédératrice à l'ENAC.

Ce projet est *open source* et l'intégralité du travail réalisé peut être réutilisé librement.

2.1 Historique

Le maître-mot de l'approche utilisée tout au long du projet Paparazzi est *incrémentalité* : nous nous sommes efforcés de définir des objectifs élémentaires à court terme et de les atteindre avant d'aller plus loin. L'avantage est de pouvoir valider au fur et à mesure les différents éléments du système et d'obtenir régulièrement des résultats probants. Cette approche a aussi quelques inconvénients puisque, faute d'une analyse globale des problèmes à résoudre, elle nécessite une remise en cause permanente des acquis. Elle peut fonctionner correctement au sein d'une équipe réduite où tous les membres ont une bonne connaissance de l'ensemble des composants ².

L'objectif initial du système Paparazzi était de participer au concours de vol autonome des Journées Micro-Drones Supaéro/Ensica. L'épreuve consistait à réaliser une mission

¹L'inscription sur nongnu.org est datée du 19 février 2003.

²Ce genre d'approche est à rapprocher de l'*Extreme Programming*, une méthode de génie logiciel qui consiste à réaliser une succession de prototypes en accumulant peu à peu les fonctionnalités. Parmi l'ensemble des règles de l'Extreme Programming, on trouve par exemple «Publier fréquemment de nouvelles versions», «Utiliser un design simple», «Réimplémenter quand c'est possible», «Programmer toujours par deux», «Intégrer les différents composants fréquemment», «Réaliser des tests unitaires», ...

complètement automatiquement, repérer une cible au sol et en donner la position. L'aéronef devait donc nécessairement embarquer une caméra vidéo.

Genèse On peut identifier trois points importants relatifs à la genèse du projet :

L'expérience importante d'A. Drouin en aéro-modélisme Cette compétence est essentielle au développement d'un micro-drone. Les modélistes ont une bonne connaissance des problèmes posés à ces échelles et des solutions correspondantes : un mini-drone est avant tout un aéro-modèle et il n'est pas nécessaire de ré-inventer cette technologie existante et disponible «sur étagère». Cette évidence n'a malheureusement pas été reconnue par certaines équipes de recherche³ qui consacrent plus de temps à construire un aéronef qu'à développer son contrôle automatique.

Le projet Autopilot Trammel Hudson et Aaron Kahn[7] ont développé un pilote automatique pour hélicoptère. La stabilisation de l'aéronef est réalisée grâce à une micro centrale inertielle recalée avec un GPS (hybridation). Ce projet est un projet ouvert et l'ensemble du code est accessible sur autopilot.sourceforge.net. Il a constitué une souche importante pour le code de Paparazzi.

Les outils de développement *open source* Le projet a nécessité l'utilisation de compilateurs pour micro-contrôleurs, de générateurs d'interface graphique, de composants graphiques, d'outils réseau, d'environnements de développement, ... Tous ces outils ont été choisis *open source* pour leur qualité, leur disponibilité (gratuité), leur évolution, et leur maintenance.

Sur ces bases, Paparazzi est naturellement né *open source*. Nous exposons ici les principales étapes du projet.

Aéronef La fonction initiale d'un drone est le vol. Le premier choix a donc été de choisir un aéronef *qui vole bien*, naturellement stable et facile à piloter. L'avion s'est donc imposé devant l'hélicoptère, au détriment de la possibilité de vol stationnaire. D'autres contraintes devaient par ailleurs être prises en compte :

- Une mise en œuvre simple et rapide est nécessaire pour pouvoir faire de nombreuses expérimentations. Pour cette raison, la propulsion électrique présente des avantages considérables sur le moteur thermique.
- La charge utile de l'avion doit être suffisante pour pouvoir embarquer des capteurs, un calculateur, une caméra, un émetteur, ...
- Le coût réduit faisait partie du cahier des charges initial.

Le choix s'est donc porté sur un «prêt à voler», le Twinstar de Multiplex (figure 2.2), disponible dans tous les magasins de modélisme pour moins de 100 €. C'est un bimoteur à ailes hautes, en polystyrène, d'1.4m d'envergure pour un poids d'1.4kg et une vitesse de croisière de 10m/s. Il est destiné aux débutants en aéro-modélisme.

³On peut citer l'exemple d'un exposé à la conférence EMAS 2004 qui décrivait la construction pas à pas d'un modèle réduit. Le travail présenté aurait été réalisé en une journée par un modéliste.

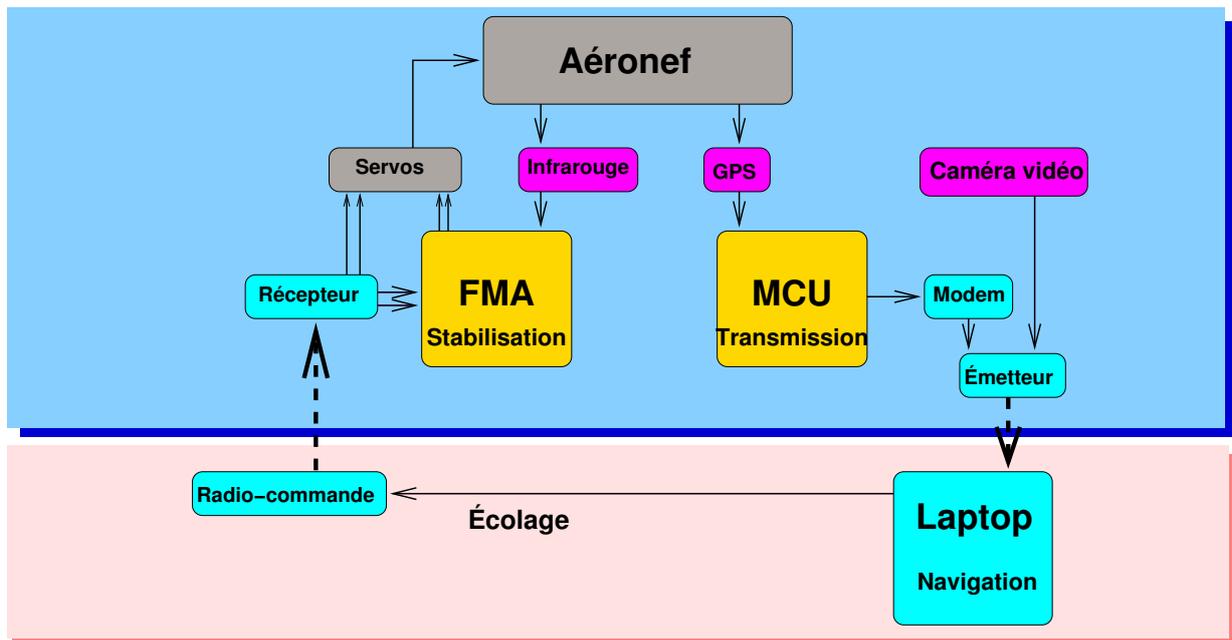


FIG. 2.1 – Schéma de principe d'un auto-pilote au sol.

Lien descendant Le contrôle d'un drone nécessite un lien bidirectionnel vers le pilote. Le lien descendant est absolument nécessaire pour surveiller le fonctionnement des systèmes embarqués. Le mini-drone devant embarquer une caméra vidéo et retransmettre les images au sol, c'est le canal audio libre de l'émetteur associé⁴ qui a été utilisé pour transmettre les données. Au sol, le récepteur est connecté à un ordinateur portable. La mise au point de ce lien descendant a été l'une des premières tâches du projet. Le lien montant est constitué naturellement par la radio-commande de modélisme.

Navigation Avec un avion très stable comme le Twinstar, la première idée a été d'utiliser un GPS, permettant un positionnement absolu, comme unique capteur pour naviguer et d'un module de stabilisation du commerce (Co-Pilot de FMA Direct) qui permet de conserver l'avion dans le plan de l'horizon grâce à des capteurs infrarouges. Pour simplifier au maximum le système embarqué, l'idée a été de transmettre les informations de position du GPS au sol, d'effectuer les calculs de navigation dans le ordinateur au sol (un simple ordinateur portable) et de piloter en connectant cet ordinateur à la radio-commande⁵ (schéma de principe figure 2.1). Cette solution nécessite un développement électronique réduit :

- dans l'avion, une carte de connexion entre le GPS et l'émetteur ;
- au sol, une carte de connexion entre l'ordinateur et la radio-commande.

⁴À une fréquence de 2.4GHz, il est autorisé en France d'utiliser un émetteur de 10mW (décision 02-1087 et 02-1088 de l'Autorité de Régulation des Télécommunications).

⁵Les radios-commandes d'aéro-modélisme possèdent une entrée «écolage» utilisée pour l'instruction au pilotage : la radio-commande de l'élève, non émettrice, est connectée à la radio-commande de l'instructeur. Cette connexion fournit une double commande dont l'instructeur reste maître.

Des algorithmes de contrôle ont ainsi pu être testés à peu de frais avec ce système basique. L'une des meilleures trajectoires obtenues apparaît en figure 2.2 (vol d'environ 45s).

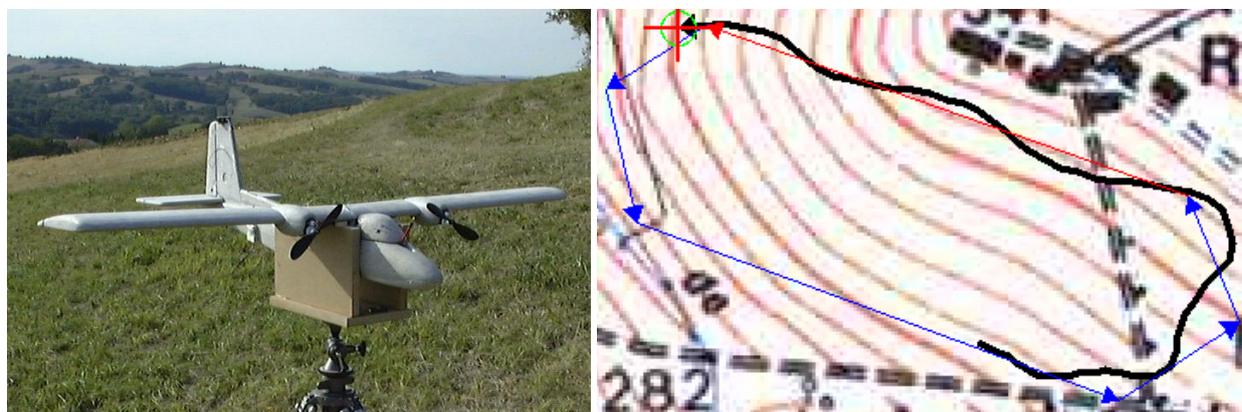


FIG. 2.2 – Twinstar (Multiplex) et portion de trajectoire réalisée avec un pilote automatique au sol.

Cette solution a deux défauts majeurs :

- la latence introduite par le lien bi-directionnel interdit un contrôle précis de la trajectoire (ondulations sur la figure) ;
- le drone n'est pas autonome : aucune récupération n'est possible si le lien est rompu (dans un sens ou dans l'autre).

Contrôle embarqué L'étape suivante a consisté à développer du *hardware* embarqué pour le pilote automatique. Une architecture à deux processeurs a été choisie afin de ségréger la partie réception de la radio-commande et commandes de vol de la partie pilote automatique. Cela a permis de garantir un fonctionnement sûr en pilotage manuel, indispensable pour les tests du pilote automatique.

Les premiers vols ont alors montré que, essentiellement pour des problèmes de calibration, le stabilisateur FMA n'était pas satisfaisant : les résultats n'étaient pas reproductibles. En s'inspirant des travaux de Taylor[13], nous avons décidé alors de ne conserver que le capteur infrarouge du système FMA et de contrôler nous même l'attitude de l'avion : l'idée est d'estimer le roulis et le tangage en mesurant une différence de température à l'horizon en sachant que le ciel est froid et la terre est chaude.

En implémentant différents processus de contrôle (stabilisation, contrôle en route, navigation et contrôle en altitude), nous avons pu obtenir des trajectoires autonomes correctes tout en conservant un décollage et un atterrissage manuels. Le schéma de principe et le schéma de contrôle de ce second système sont donnés en figures 2.9 et 2.10.

Une mini-caméra vidéo couleur (figure 2.4) a été ajoutée et le Twinstar ainsi équipé a remporté en septembre 2003 le trophée en vol autonome des Journées Micro-Drones⁶. La trajectoire réalisée est reproduite en figure 2.5 : à cause de la non prise en compte du vent

⁶www.ensica.fr/microdrone/Actes2003/Trophee/Trophee.htm

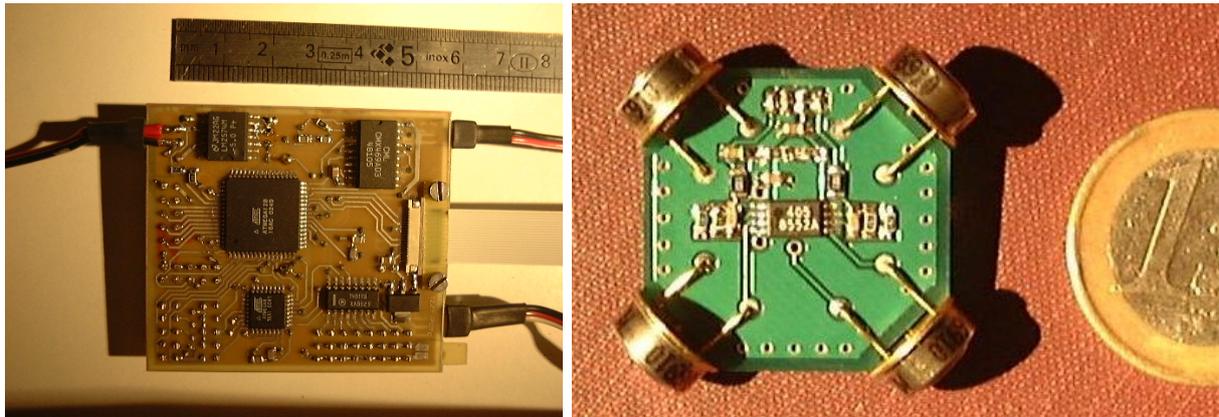


FIG. 2.3 – Première carte de contrôle embarquée et quadruple capteur infrarouge.

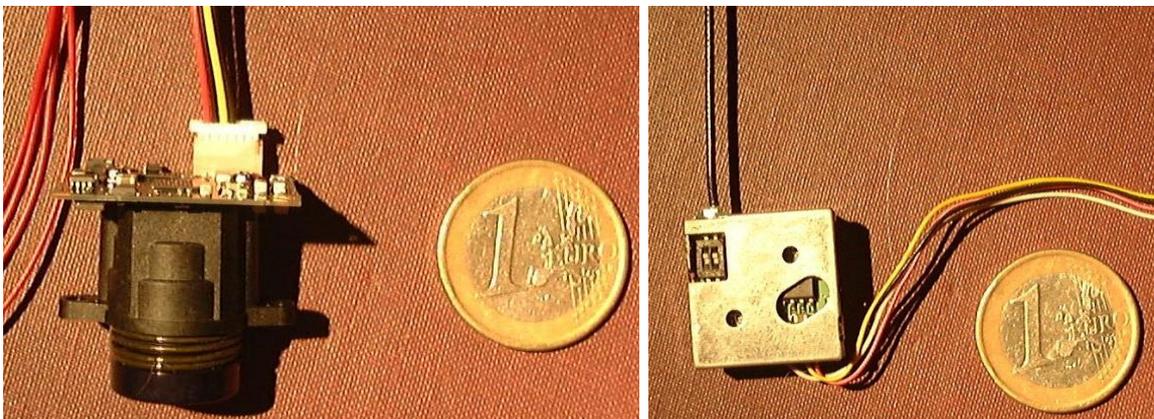


FIG. 2.4 – Caméra vidéo et émetteur

et d'un contrôle en cap uniquement (l'avion vise le prochain *waypoint*), la trajectoire est loin d'être parfaite. La cible a cependant pu être repérée avec une erreur de moins de 25m.

Maxi-Kiool En 2002, l'épreuve de vol simple des Journées Micro-Drones avait été remportée par le Minus-Kiool, un avion de 20cm et 56g développé par une équipe de Supaéro. Nous avons instrumenté une version plus grosse (60cm) de cet aéro-modèle avec le système Paparazzi (figure 2.6). Cette aile a le défaut d'être délicate à lancer, délicate à piloter et fragile à l'atterrissage. De plus, les performances du maxi-Kiool, notamment en vitesse, n'étaient pas celles attendues. Nous avons abandonné les tests sur cette cellule.

Déminage Suite au trophée Supaéro, nous avons été contactés par Hugo Neira (Fondmetal Technologie), intéressé par le système Paparazzi afin d'instrumenter un drone pour une application de déminage. Nous lui avons livré un Twinstar complètement équipé pour qu'il puisse se familiariser avec le système avant de le transposer dans sa cellule (d'envergure et

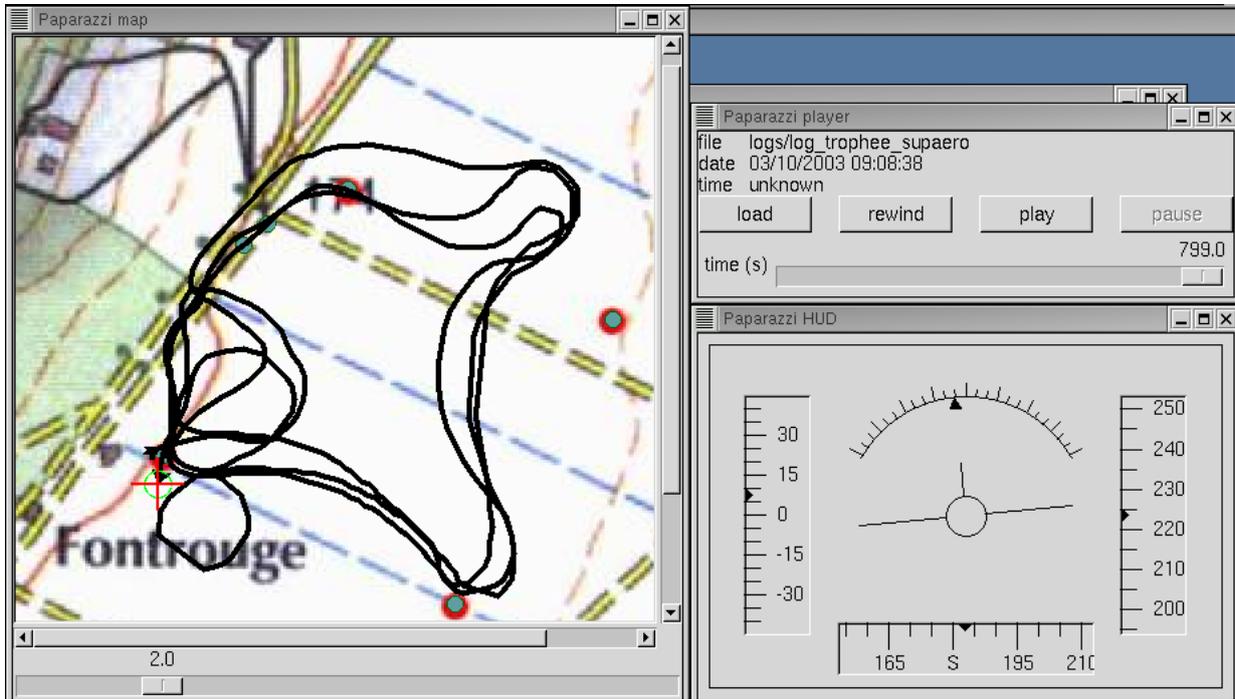


FIG. 2.5 – Trajectoire réalisée aux Journées Micro-Drones 2003



FIG. 2.6 – Maxi-Kiool équipé de Paparazzi.

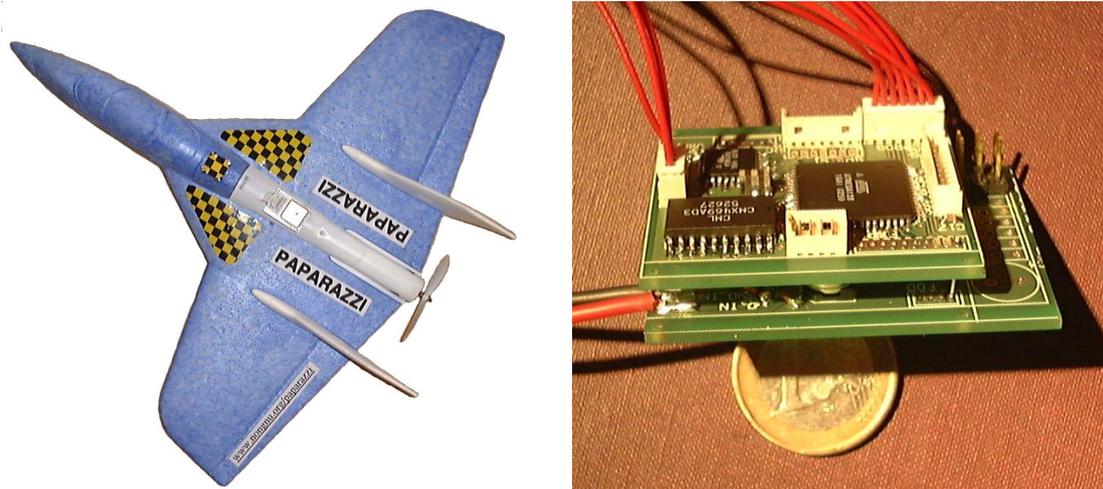


FIG. 2.7 – Microjet (Multiplex) et carte de contrôle embarquée de seconde génération.

de masse plus importante). Ce projet n'a malheureusement pas encore abouti.

Configuration Lors de l'équipement du Maxi-Kiool et du second Twinstar pour Fondmetal Technologie, nous avons été amenés à développer un certain nombre d'outils de configuration. Le software, auparavant ad hoc pour la cellule et la radio-commande, a été largement réécrit pour le rendre paramétrable plus simplement. L'expérience avec un «client» nous a forcé à simplifier ces configurations, notamment à travers l'usage d'interfaces graphiques. Ces efforts ont essentiellement été faits pour rendre le système utilisable par des opérateurs sans connaissance importante en informatique.

Miniaturisation Pour être transportable facilement, un mini-drone doit être le plus petit possible. L'objectif dans ce domaine est donc la miniaturisation. L'étape suivante du projet Paparazzi a été de choisir une cellule plus petite tout en respectant les contraintes initiales : facilité de mise en œuvre et qualité de vol. Le Microjet de Multiplex (figure 2.7) est une aile delta de 60cm et 400g qui répond à ces attentes. À l'occasion de ce portage, la carte embarquée a également été redessinée et miniaturisée.

Cette configuration a permis de remporter en juillet 2004 l'épreuve de vol autonome de EMAV 2004 (First European Micro Air Vehicle Conference) face à deux avions Carolo de l'équipe de l'université de Braunschweig et au DO-MAV d'EADS-Dornier. Malgré des conditions de vol très délicates (vent violent), le système Paparazzi a confirmé sa robustesse et sa fiabilité.

Aujourd'hui La fiabilité du système Paparazzi permet de réaliser des missions de plusieurs kilomètres complètement automatiquement (le Twinstar a une autonomie de 45mn, plus de 25km). La mission est spécifiée en utilisant un langage de haut niveau permettant

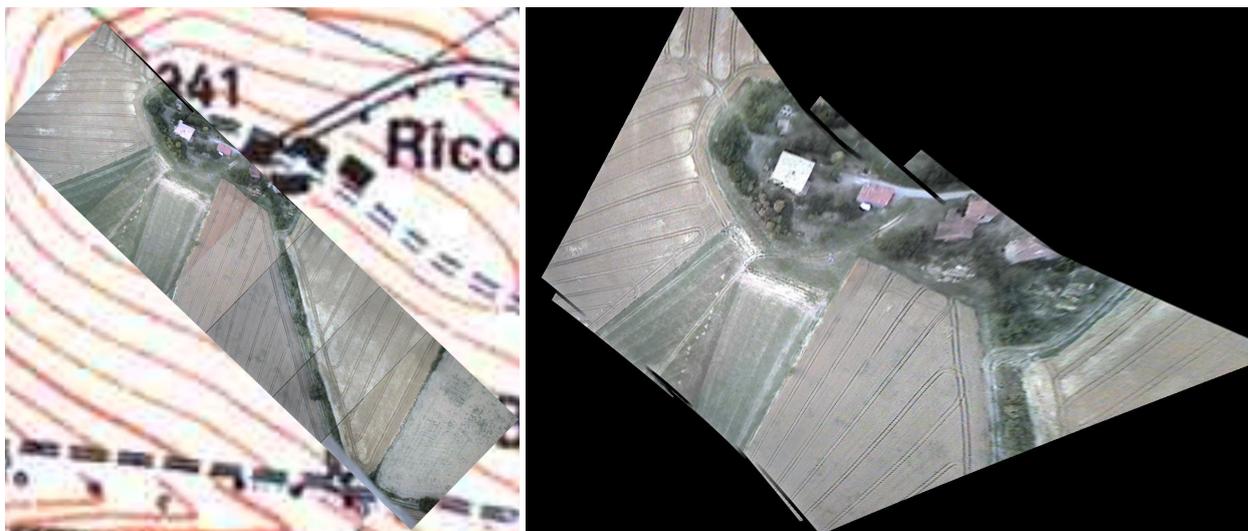


FIG. 2.8 – Recollages manuels et automatiques d’images provenant d’une vidéo.

en particulier de répéter des actions (réponse au «Dull» des «3D»). Par exemple, un balayage régulier d’une zone a été réalisé et les images obtenues avec la caméra vidéo peuvent être assemblées pour fabriquer une photo aérienne avec une couverture importante⁷. Les résultats préliminaires sont présentés figure 2.8.

Le décollage est dorénavant entièrement automatique. Nous travaillons sur une procédure d’atterrissage qui, sans être complètement autonome, pourrait être contrôlée par un opérateur sans expérience de pilotage. Dans le même ordre d’idée nous développons un mode de pilotage manuel basé sur des ordres de haut niveau (position et altitude).

2.2 Le système Paparazzi

Nous détaillons dans cette section les différents composants et le fonctionnement du système actuel ainsi que sa mise en œuvre.

2.2.1 Les composants

2.2.1.1 Système embarqué

Le système embarqué, en plus des éléments classiques d’un aéro-modèle (récepteur, servo-commandes et batterie), comporte au minimum :

- une carte contrôleur avec son alimentation ;
- un récepteur GPS ;
- un quadruple capteur infrarouge ;

⁷Mathieu Tobie, stagiaire au LOG, ENAC, développe actuellement un logiciel de recollage automatique de ces images.

Manuel : Les ordres reçus de la radio-commande sont interprétés directement comme des commandes de vol. C'est le fonctionnement d'un aéro-modèle standard.

Automatique Les commandes de vol sont envoyées par MCU0. Ce mode est enclenché sur ordre de la radio-commande et persiste uniquement si MCU0 envoie régulièrement des consignes. Il y a également passage du mode manuel au mode automatique si la réception de la radio-commande est rompue.

Failsafe MCU1 commute dans ce mode si aucun ordre n'est reçu ni de la radio-commande, ni de MCU0. Les gouvernes sont alors mises au neutre (pour planer) et le moteur arrêté.

Le micro-contrôleur MCU1 peut donc fonctionner seul, pour assurer le pilotage manuel standard en aéro-modélisme. Le code de MCU1 est extrêmement réduit et évolue très peu.

Autopilot Le cœur du pilote automatique réside dans le micro-contrôleur MCU0. Celui-ci gère trois modes de fonctionnement principaux (voir figure 2.10) :

Manuel : les ordres reçus de la radio-commande sont utilisés comme entrées pour la boucle de stabilisation. Ainsi le pilote ne commande pas les ailerons et la gouverne de profondeur mais les angles de roulis et tangage. Ce mode permet de tester le contrôleur d'attitude seul. Il est utilisable par un pilote débutant, le contrôleur assurant que l'avion reste dans son domaine de vol.

Automatique : les consignes envoyées au contrôleur d'attitude et à la propulsion sont calculés à partir de la route et de l'altitude voulues. La route et l'altitude sont elles-mêmes calculées pour suivre la mission (essentiellement une suite de points de report). Dans ce mode, trois boucles de contrôle sont donc empilées. La stabilisation est réalisée à 20Hz et la navigation à la fréquence des informations délivrés par le GPS (4Hz). La mission est également contrôlée à 20Hz car elle doit pouvoir prendre en compte des *événements* exceptionnels (ordre de la radio-commande, temps de vol, tension de la batterie, ...)

Home (retour à la maison) : il s'agit d'un mode de navigation basique où l'avion doit revenir à la balise HOME de la mission (son point de départ sauf exception) en visant une altitude de sécurité. Ce mode est enclenché si le lien montant est rompu en mode Manuel ou dans tous les cas si une distance de sécurité au waypoint HOME est dépassée.

Le mode Home a sauvé deux fois le Microjet pendant les premiers vols, suite à des problèmes de portée de la radio-commande. Il a également été enclenché pendant la compétition EMAV 2004 suite à une déviation de trajectoire due au vent violent⁸.

Stabilisation La stabilisation est assurée grâce aux capteurs infrarouges. Aux petits angles, on estime que la variation d'angle de roulis (resp. tangage) est proportionnelle (coefficient α) à la différence des températures mesurées à l'avant et à l'arrière dans l'axe de

⁸Le Carolo de l'équipe de Braunschweig ne possédait malheureusement pas cette fonction et l'avion a été perdu pendant l'épreuve.

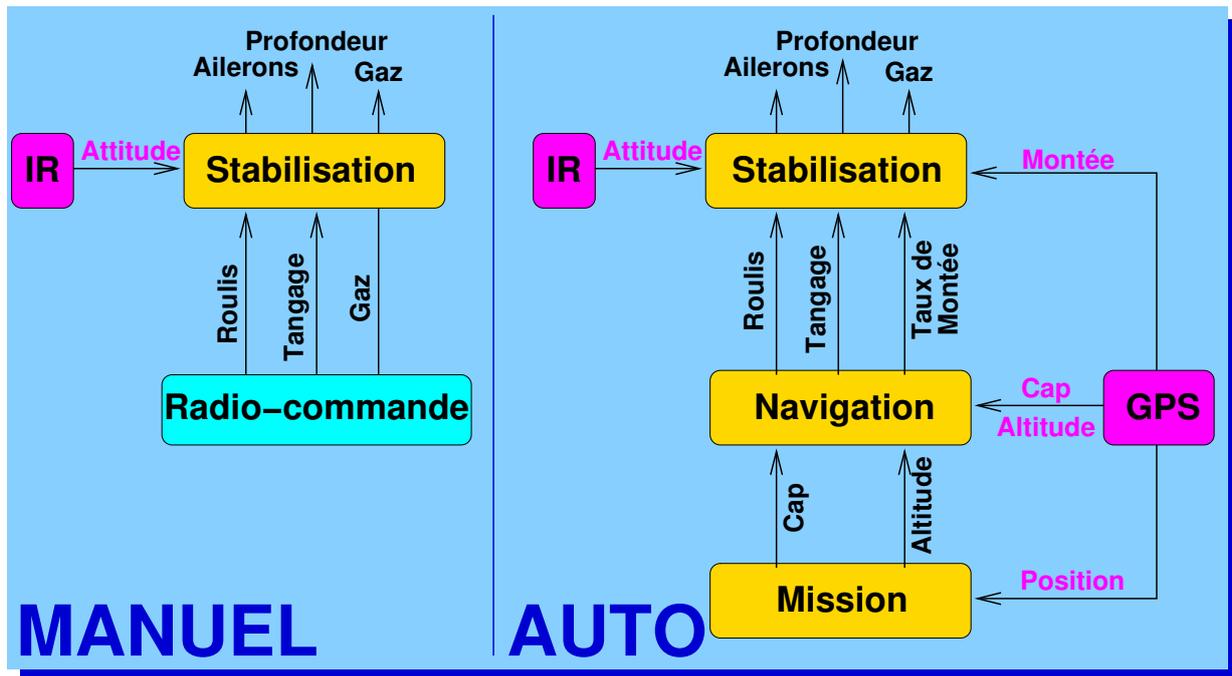


FIG. 2.10 – Contrôle en pilotage manuel assisté et automatique

l'avion (respectivement à droite et à gauche). Le coefficient α en jeu n'est malheureusement pas constant et dépend des conditions de contraste (différence entre température du ciel et de la terre), contraste qui varie essentiellement avec la nébulosité. Deux calibrations permettent d'estimer ce coefficient :

statique : avant le décollage, on mesure le contraste maximum et on en déduit une valeur initiale pour le coefficient.

dynamique : pendant le vol, en virage coordonné, l'angle de roulis est en relation directe avec le taux de virage. Ce taux de virage est estimé avec les mesures GPS. Combiné avec la mesure infrarouge, il permet d'estimer en continu le coefficient α avec un filtre simple⁹.

L'estimation de l'attitude sert d'entrée à un contrôleur proportionnel (la commande donnée est proportionnelle à l'erreur, différence entre la consigne et la mesure).

L'expérience montre que cette approche simpliste est robuste et suffisamment précise sur les aéronefs testés. Cette solution ne fonctionne évidemment qu'en condition VMC. Deux problèmes ont été identifiés :

- L'attitude est liée à la variation de cap or le GPS ne fournit qu'une variation de route. Il n'est pas possible de corriger sans information sur la vitesse et la direction du vent.
- Quand le soleil est bas sur l'horizon, la mesure infrarouge est perturbée ; l'effet de bord est une variation de vitesse en fonction de la direction. Quand il est face au soleil,

⁹Une étude de cet estimateur a été réalisé lors d'un projet d'élèves IENAC-L.

l'avion se croit piqueur et il corrige en cabrant (ce qui se traduit par un ralentissement puisque la vitesse air n'est pas contrôlée).

Navigation Le contrôle de la trajectoire repose uniquement sur les informations fournies par le GPS, en taux de montée et en route. Pour le contrôle latéral, une consigne d'inclinaison est calculée (contrôleur proportionnel) à partir de l'erreur en route. La même solution est utilisée pour le contrôle longitudinal, avec une consigne constante (paramétrable dans la mission). Le contrôle du taux de montée s'effectue uniquement avec les gaz.

Mission Les contrôleurs de niveau supérieur s'intéressent à la position et à l'altitude. Trois modes horizontaux ont été implémentés :

Cap : la consigne de cap est constante. Ce mode est utilisé pendant la phase de décollage (l'avion étant lancé à la main, il n'a pas à conserver «l'axe de la piste»).

Waypoint : navigation vers un point. La consigne de cap est calculée pour rejoindre directement un point donné¹⁰.

Radial : navigation sur une route. La consigne de cap est calculée pour rejoindre une *carotte*, un point sur la route désirée qui progresse en même temps que l'aéronef tout en restant toujours devant (i.e. en avance de quelques secondes). Cette technique est communément désignée *follow the carrot*[5].

Symétriquement, trois modes pour l'évolution dans le plan vertical sont proposés :

Climb : consigne constante de taux de montée. Ce mode peut être utilisé pour la montée initiale.

Altitude : la consigne de taux de montée est calculée à partir d'une altitude désirée.

Glide : la consigne est calculée pour suivre une rampe donnée (en faisant glisser la *carotte* sur cette rampe). Ce mode est prévu pour l'atterrissage.

Le contrôle doit également enchaîner les différentes étapes du plan de vol en évaluant des conditions qui peuvent porter sur divers paramètres : temps de vol, altitude, proximité du point de report, tension d'alimentation, ordre du pilote, ...

2.2.1.2 Station sol

La station de contrôle est constituée d'une radio-commande traditionnelle, d'un récepteur et d'un ordinateur (si possible portable!). Les canaux audio et vidéo du récepteur sont respectivement connectés à l'ordinateur (habituellement via un modem) et à un magnétoscope (un camescope grand public muni d'une entrée analogique est suffisant).

L'ordinateur reçoit les informations du lien descendant et diverses interfaces permettent de les afficher :

¹⁰Tous les calculs de navigation sont effectués dans un repère local orthonormé Est-Nord-Zénith où la terre est considérée plate. Cette approximation est justifiée par le faible rayon d'action du mini-drone. Les calculs s'en trouvent largement simplifiés.

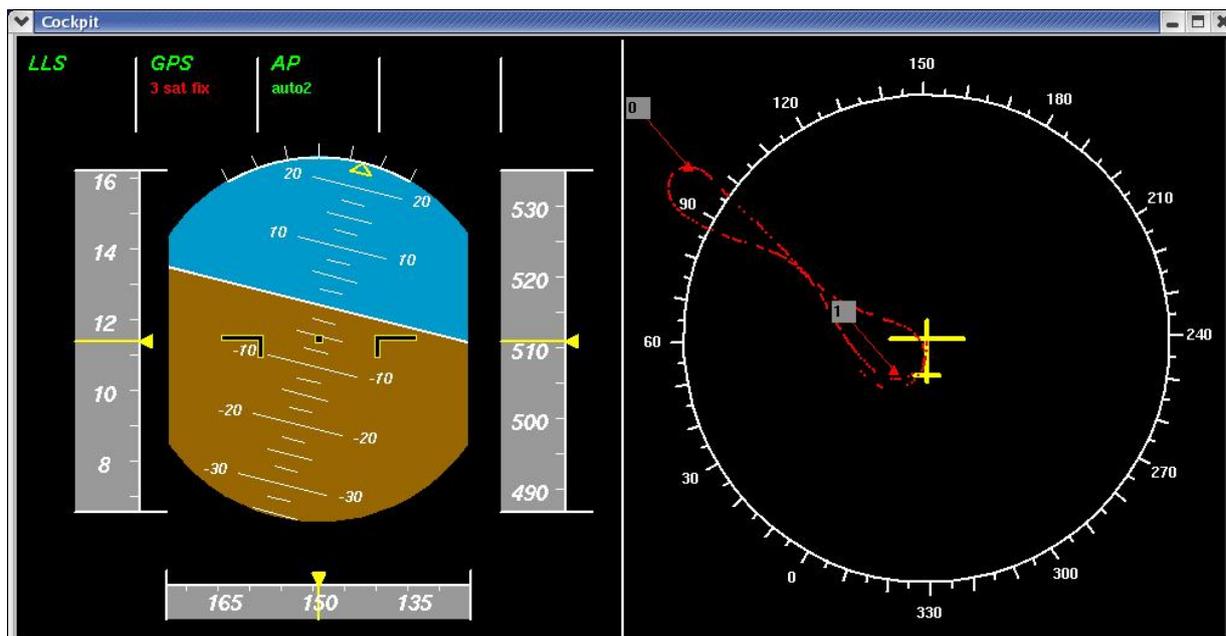


FIG. 2.11 – Affichage des paramètres de vol principaux

- Les paramètres de vol principaux (attitude, vitesse, altitude, ...) sont représentés autour d'un horizon artificiel (figure 2.11).
- La mission et la trajectoire sont affichées sur un fond de carte (figure 2.5).
- Tous les messages envoyés par l'aéronef sont affichés à travers une interface générique.

L'ensemble des éléments de la station de contrôle communiquent via IVY, le bus logiciel développé au CENA. La bibliothèque ZINC (Zinc Is Not Canvas) développée également au CENA spécifiquement pour des outils ATC, a aussi été utilisée¹¹.

Tous les messages envoyés par le drone sont stockés dans un journal qui peut être rejoué ultérieurement.

2.2.2 Mise en œuvre

Nous détaillons ici les différentes étapes de l'utilisation du système Paparazzi depuis l'installation jusqu'aux tests en vol.

2.2.2.1 Configuration

Le système Paparazzi est configurable pour l'aéronef instrumenté. Une interface de configuration (figure 2.12) permet de tester le *hardware*¹², de choisir les canaux de la radio-commande et de configurer la cellule : débattement des gouvernes, relations entre consignes

¹¹IVY et ZINC sont publiés sous licence LGPL.

¹²La programmation du système embarqué est réalisée avec un *programmeur* connecté au port parallèle de l'ordinateur.

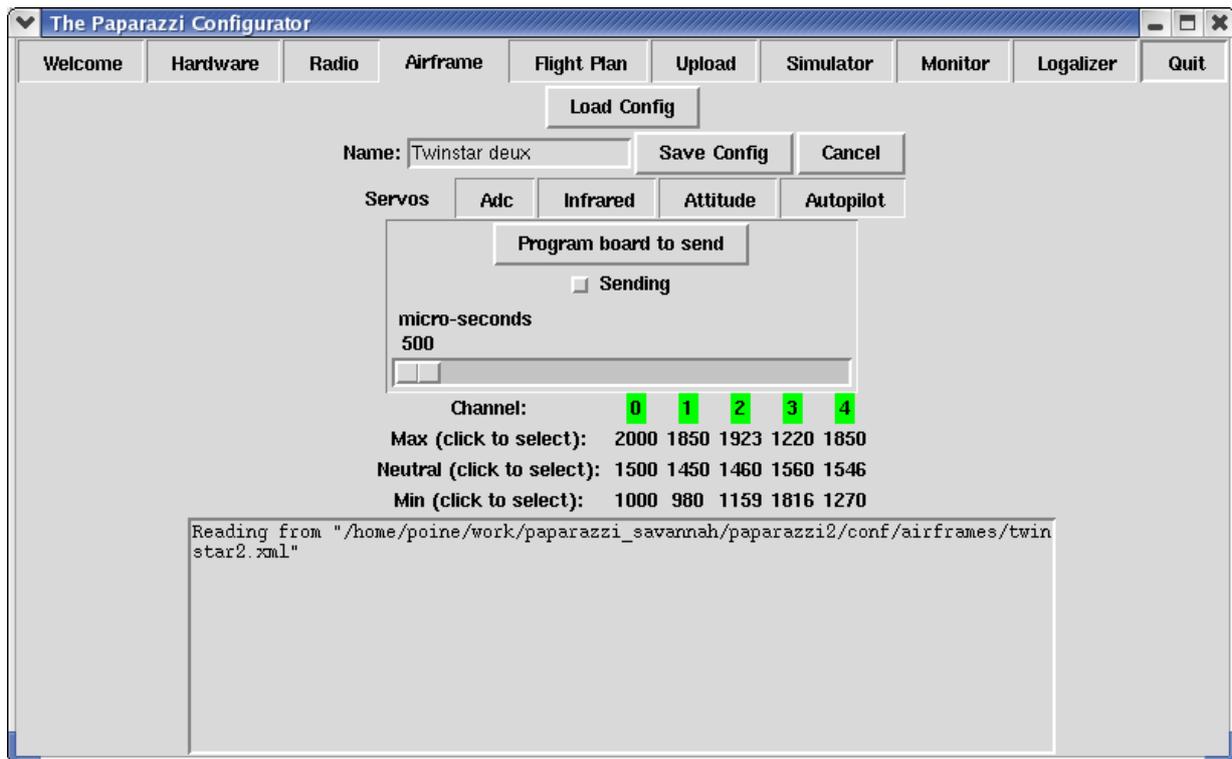


FIG. 2.12 – IHM de configuration du modèle (calibration des gouvernes)

et commandes¹³, calibration des capteurs (infrarouge, tension, ...), réglage des contrôleurs du pilote automatique, ...

2.2.2.2 Préparation d'une mission

Nous avons défini un langage de haut niveau permettant de spécifier un plan de vol. Ce langage peut être comparé à un langage de programmation classique. Il est utilisable directement avec un éditeur de texte ou à travers une interface graphique¹⁴ (figure 2.13).

Un extrait de mission est donné sur la figure 2.14. Trois *blocs* successifs y sont définis : le premier spécifie un décollage, le deuxième une attente entre deux points et le troisième un atterrissage (une tentative!).

Pour le décollage, on commence (ligne 2) par attendre le lancer (détecté avec une vitesse sol supérieure à un seuil fixé). On poursuit (ligne 3) par une montée au cap QFU, contrôlée avec une puissance constante (80%) pendant 8s. Ligne 4, on continue au même cap, cabré à 0.1 (radian), en montant avec une vitesse verticale de 3m/s, jusqu'à atteindre une altitude de sécurité.

¹³La calibration des gouvernes et leurs commandes (mixage, ...) est programmée dans la radio-commande en aéro-modélisme standard. Cette programmation n'est plus nécessaire (et fortement déconseillée) avec le système Paparazzi.

¹⁴Le développement de l'éditeur de mission a été réalisé en projet par des élèves IENAC-S.

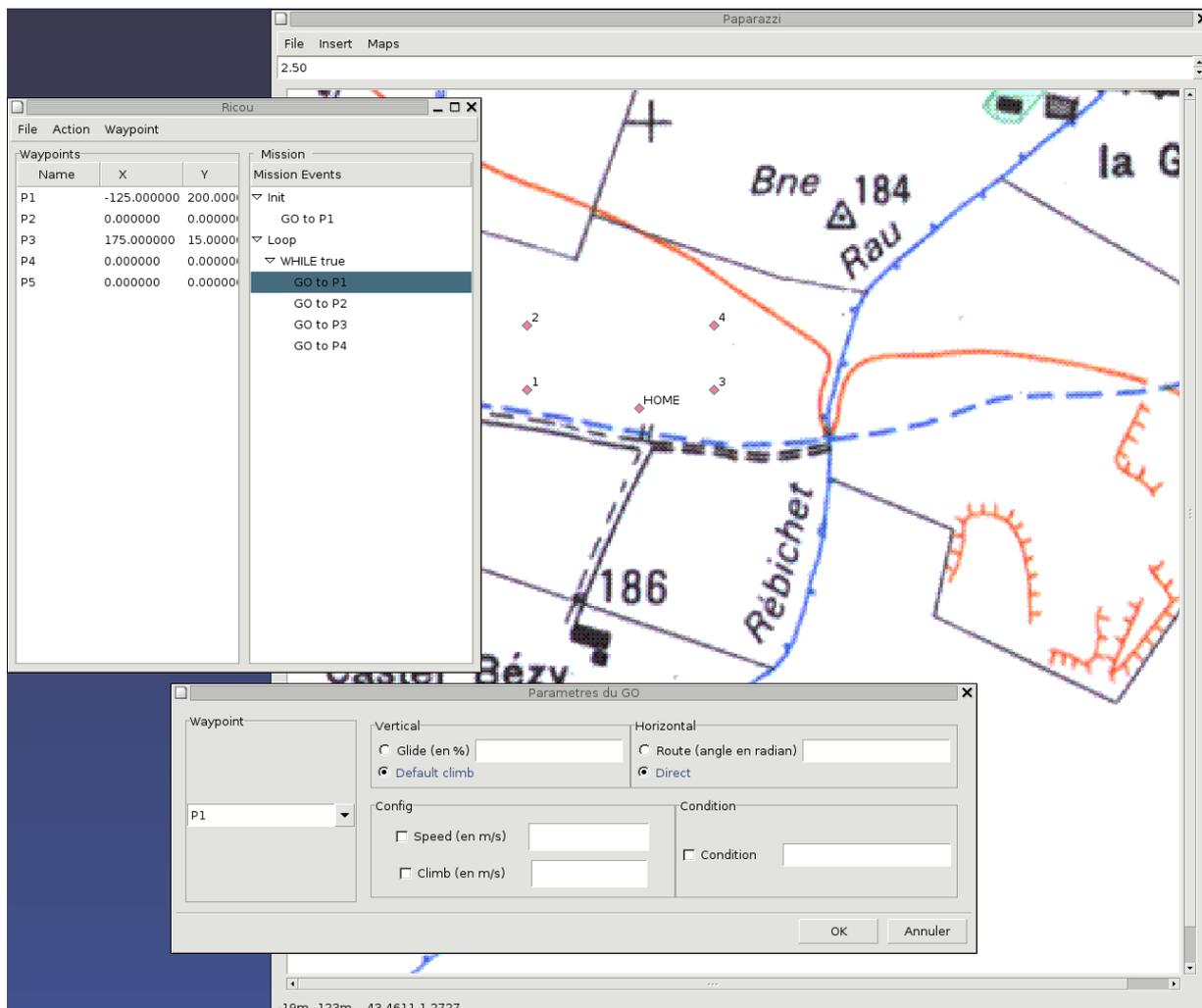


FIG. 2.13 – IHM de préparation d’une mission sur un fond de carte

```

1 <block name="TAKE OFF">
2   <while cond="(!launch)"/>
3     <heading course="QFU" vmode="gaz" gaz="0.8" until="(flight_time > 8)"/>
4     <heading course="QFU" pitch="0.1" vmode="climb" climb="3.0" until="(z > SECURITY_ALT)"/>
5   </block>
6
7   <block name="STACK">
8     <exception cond="RC_Event" deroute="LAND"/>
9     <while>
10      <go wp="WP1"/>
11      <go wp="WP2"/>
12    </while>
13  </block>
14
15  <block name="LAND">
16    <exception cond="RC_Event" deroute="STACK"/>
17    <go wp="IAF"/>
18    <go wp="FAF"/>
19    <go wp="THRS" hmode="route" pitch="0.1" vmode="glide"/>
20  </block>

```

FIG. 2.14 – Extrait d’une mission.

Le deuxième bloc est nettement plus simple et consiste à boucler (`while` ligne 9) indéfiniment entre les points WP1 et WP2 (définis précédemment dans la mission). La directive `exception` (ligne 8) spécifie une sortie du bloc sur une condition `RC_Event` (ordre de la radio-commande) et un déroutement sur le bloc `LAND`.

Le troisième bloc définit une procédure d’atterrissage avec suivi d’un glide (ligne 19). Cette procédure peut être abandonnée à tout instant (exception ligne 16) pour un retour sur le deuxième bloc.

Une mission ainsi décrite est compilée en un programme (en C) d’ordres élémentaires, programme qui doit ensuite être téléchargé dans le pilote automatique.

2.2.2.3 Simulateur

La sophistication du langage de mission induit un risque d’erreur important. Il est donc relativement important de pouvoir simuler le plan de vol avant le vol réel afin de détecter les problèmes éventuels. De plus, le plan de vol étant pré-traité (transformé en C) avant de pouvoir être exécuté par le calculateur embarqué, cette transformation peut également être source d’erreur (notamment pendant la phase d’implémentation).

Nous avons développé un simulateur où le programme de l’auto-pilote est exécuté réellement sur le processeur embarqué. Son principe est décrit figure 2.15, à comparer avec le schéma de principe figure 2.9 : l’idée est simplement d’intercaler dans le système un simulateur à la place de l’aéronef en le connectant aux sorties (les ordres aux servo-commandes)

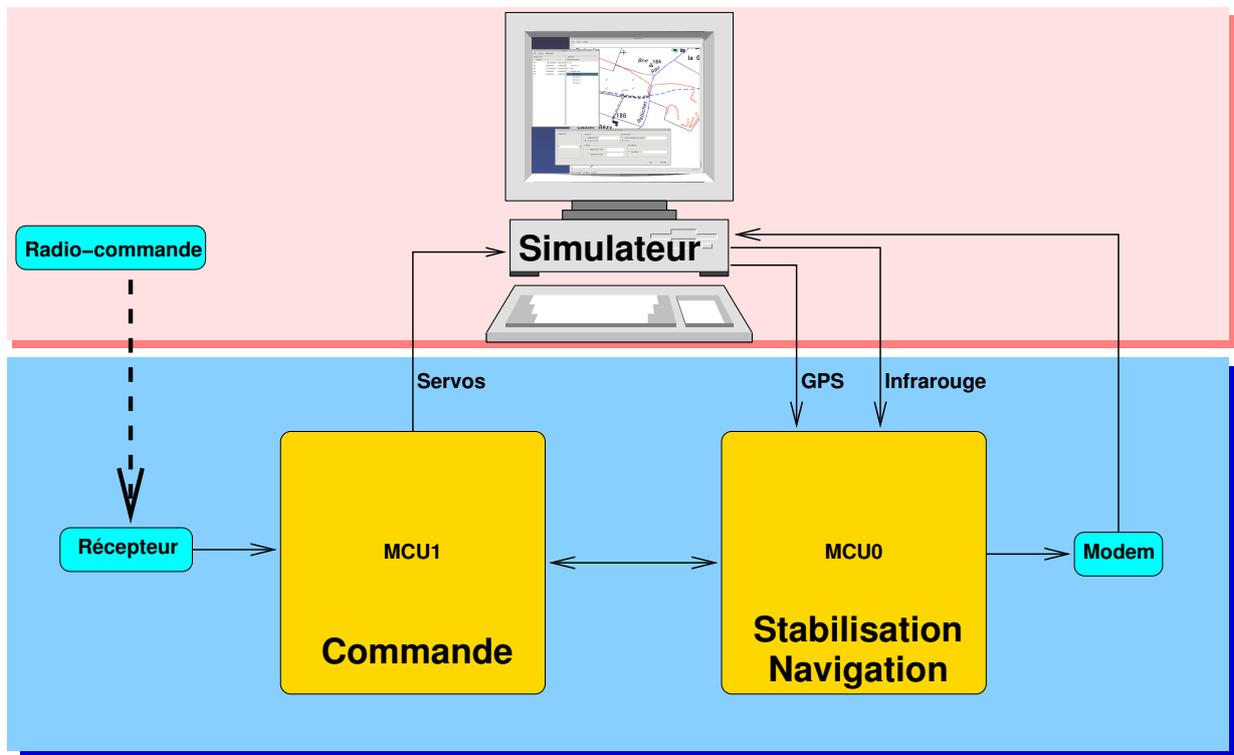


FIG. 2.15 – Schéma de principe d'une simulation *hardware in the loop*

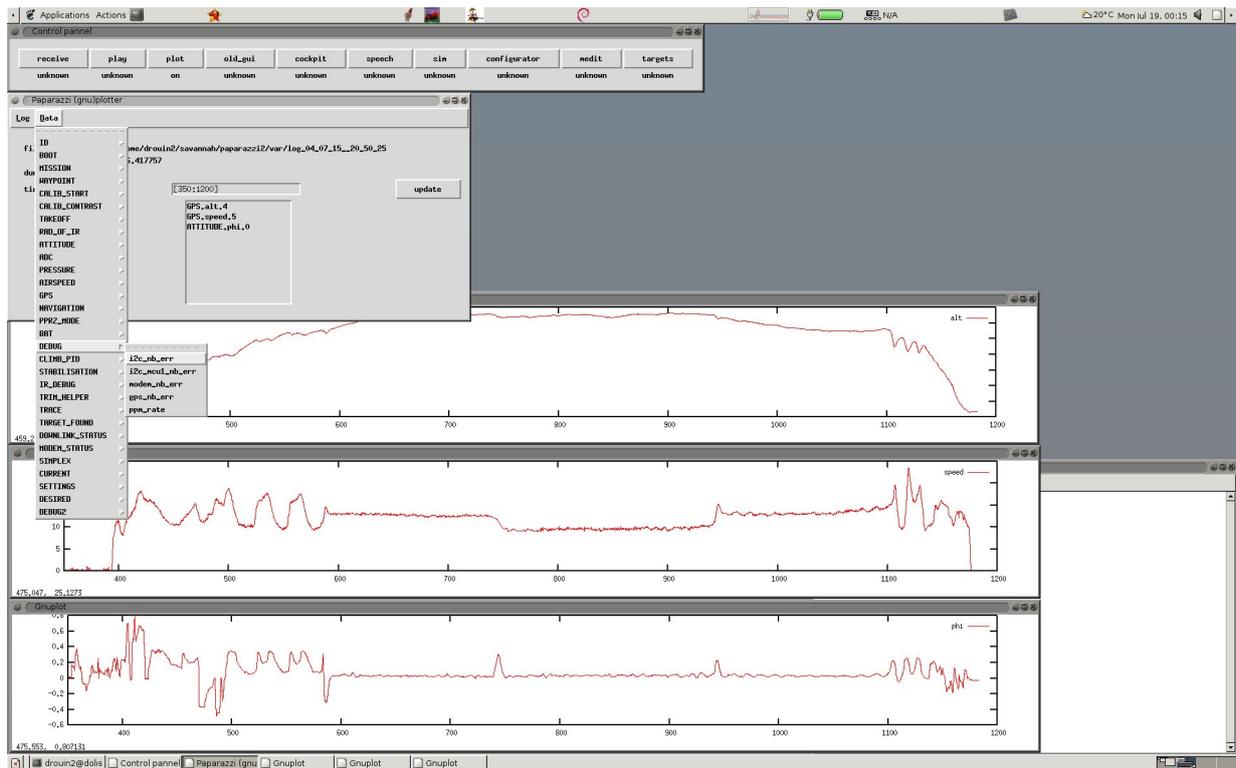


FIG. 2.16 – Outil d’analyse des paramètres du vol

et aux entrées (les capteurs) de l’auto-pilote. Le simulateur exécute un modèle avion très limité, non nécessairement représentatif des caractéristiques de l’aéronef. L’objectif n’est donc pas de calibrer les contrôleurs de bas niveau (attitude, cap, montée) mais seulement de valider les différentes phases de la mission.

2.2.2.4 Vol

Pour être effectué dans des conditions optimales, un vol nécessite deux opérateurs : le pilote qui manipule la radio-commande et un assistant qui surveille les paramètres de vol et le déroulement de la mission. Le pilotage manuel n’est normalement utile aujourd’hui que pour la phase d’atterrissage. Cependant c’est la radio-commande qui permet de contrôler les différentes phases de la mission (en utilisant un interrupteur simple).

2.2.2.5 Analyse

Une partie importante du travail lors du développement de l’auto-pilote est consacrée à l’analyse des trajectoires effectuées. Elle est rendue possible par la sauvegarde dans un journal de l’ensemble des informations envoyées par le drone¹⁵. Un ensemble d’outils permet ensuite de *rejouer* le vol ou d’observer l’évolution des paramètres de vol (pour vérifier par

¹⁵Le débit actuel du lien descendant est de 480 octets/s. Ce canal est saturé en permanence.

exemple que les consignes ont bien été suivies). Une visualisation graphique (figure 2.16) facilite cette analyse.

2.3 Perspectives

Les évolutions du projet sont nombreuses, tant du côté du système lui-même que de ces applications. Nous en listons ici quelques-unes envisagées à court terme :

- Génération de code sûr : de nombreuses parties du code embarqué peuvent être considérées critiques pour la sûreté de la mission. La confiance en ce code peut être grandement améliorée par l'utilisation de méthodes formelles permettant de prouver des propriétés vérifiées par le programme. Cette approche a été utilisée avec succès pour le pilotage du métro VAL par exemple mais elle est peu présente dans le domaine aéronautique. Pour Paparazzi, l'idée est de spécifier la gestion du vol manuel (MCU1) et les fonctions essentielles de l'auto-pilote (en particulier le mode HOME, c.f. 2.2.1.1) avec un langage temps réel de haut niveau (Lustre, Signal, Esterel, ...) et de générer automatiquement le code embarqué¹⁶. Ce travail devrait faire l'objet d'un stage de DEA prochainement.
- La précision des trajectoires réalisée actuellement est fortement limitée par le nombre réduit de capteurs, qui en particulier ne permettent pas d'estimer correctement la vitesse et la direction du vent. Un compas magnétique et un badin seraient particulièrement utiles. Pour espérer réaliser un atterrissage automatique arrondi, l'usage d'un télémètre est indispensable (la précision verticale donnée par le GPS n'étant pas suffisante). L'ajout d'une centrale inertielle et son hybridation avec le GPS permettrait de compléter les mesures infrarouges ou de les remplacer.
- L'utilisation de la radio-commande pour le lien montant et le faible débit sur le lien descendant sont actuellement assez limitant. Ces limitations vont être levées par l'emploi de *modems radio*. Les composants envisagés ont l'avantage d'utiliser une bande de fréquence où une puissance d'émission assez importante est utilisable¹⁷.
- Le vol stationnaire est un ajout majeur pour de nombreuses applications des mini-drones. Il est donc intéressant de développer le système Paparazzi sur un hélicoptère. L'un des problèmes essentiel à résoudre concerne la stabilisation qui ne peut être réalisée qu'avec une centrale inertielle. Cependant, les résultats obtenus au sein du projet Autopilot (c.f. 2.1) constituent une excellente base.
- La charge utile du Twinstar est de l'ordre de 500g. En restant aux mêmes échelles, nous envisageons d'équiper une cellule plus grosse pour avoir environ 1kg de charge utile. Cela permettra en particulier d'embarquer un caméscope DV pour réaliser des vidéos de haute définition. L'autre application en vue consisterait à embarquer un capteur de 600g pour effectuer des mesures de pollution pour Météo-France. Cette application nécessitant éventuellement le survol de zones habitées, des autorisations particulières seront nécessaires.

¹⁶Cette méthode a déjà été utilisée à l'École des Mines de Nantes pour piloter des robots Lego.

¹⁷A 868MHz, la décision 02-939 de l'autorité de régulation mentionne une puissance maximale de 500mW.

- L'objet du projet Paparazzi et les choix d'en faire un système ouvert en font un candidat parfait pour devenir un support pédagogique à l'ENAC. Cette activité fait intervenir de nombreux domaines étudiés à l'ENAC, en particulier dans le cadre de la formation IENAC : électronique, automatique, informatique, interfaces homme-machine, réglementation, gestion de projet, ... Cela pourrait constituer une activité fédératrice inter-départements.

Conclusion

De nombreuses activités aériennes civiles sont candidates à être effectuées par des drones et la question qui se posera peut-être un jour aux opérateurs sera la justification de la présence d'un pilote à bord. Ces évolutions seront plus ou moins rapides en fonction de la catégorie de drones utilisés. Nous avons vu qu'aujourd'hui, seule la catégorie des MALEs, les drones les plus ressemblants aux avions traditionnels, est vraiment maîtrisée et disponible sur le marché. Les analyses montrent que dans les autres catégories, alors que l'évolution des mini-drones est avant tout un défi technologique, les perspectives des HALEs, en particulier des avions géostationnaires, sont essentiellement liées à la demande de services que pourront rendre ces avions.

Malheureusement, ce sont les drones volant à moyenne altitude qui interfèrent principalement avec la circulation aérienne classique ; alors que les drones légers resteront en-dessous de l'espace aérien et les drones géostationnaires au-dessus, les drones MALEs doivent être véritablement intégrés au trafic actuel. Cette intégration demande encore des efforts considérables de réglementation, les travaux actuels ne constituant que des prémisses.

La réglementation des drones légers est du ressort national. La DGAC a donc un rôle à jouer dans le domaine. D'une part la réglementation actuelle (c.f. 1.3.1) des aéro-modèles ne correspond ni aux capacités des mini-drones d'aujourd'hui, ni à leurs applications potentielles. D'autre part, les propositions du JAA/Eurocontrol Task Force (c.f. 1.3.3) sont un peu simplistes : une réglementation unique pour des avions de moins de 150kg ne semble pas tenir compte, ni de la diversité des performances, ni de la diversité des risques. Alors que les risques éventuels avec un drone d'un kilogramme sont pratiquement nuls (mis à part lors d'un crash sur une autoroute), les implications du crash potentiel d'un drone de 150kg doivent être étudiées précisément.

Nous avons exposé en détail à quoi pouvait ressembler un mini-drone à travers la description du projet Paparazzi. Cette réalisation a permis d'explorer la technologie du domaine. Les résultats obtenus permettent d'envisager, d'imaginer, des applications à court ou moyen terme. Certaines de ces applications pourront faire l'objet de demande d'autorisations spéciales auprès de la DGAC (qui se traduirait par un NOTAM protégeant une zone par exemple).

Ce secteur en plein essor¹⁸ pourrait devenir un centre d'intérêt important à l'ENAC : les aspects réglementaires et technologiques peuvent donner lieu à de nombreux projets.

¹⁸Certains analystes prévoient qu'il y aura plus de drones militaires vendus pendant la décennie à venir que pendant les quarante dernières années.

En particulier, l'étude des mini-drones peut être un prétexte à des réalisations concrètes impliquant les compétences variées des équipes d'enseignants et de chercheurs de l'École. La première étape est de définir sous quelle forme pourrait naître cette activité.

Glossaire

ACAS Airborne Collision Avoidance Systems

EASA European Aviation Safety Agency

GPL Gnu Public Licence

HALE High-Altitude Long-Endurance

JAA Joint Aviation Authorities

MALE Medium-Altitude Long-Endurance

MAV Micro Air Vehicle

MCU Micro Controller Unit

ROA Remotely Operated Aircraft (acronyme américain pour UAV)

UAV Unmanned Aerial Vehicle

UAVp UAV Pilot (station sol)

USICO Unmanned aerial vehicle Safety Issues for Civil Operations

Bibliographie

- [1] R G Austin and G Earp. Power line inspection by UAV : A business case. In *19th international UAV Systems Conference*, Bristol, UK, 2004.
- [2] Peter Van Blyenburgh. Uavs s where do we stand ? *Military Technology*, pages 29–30, March 1999.
- [3] Marci Buschmann, Jens Bange, and Peter Vörsmann. MMAV - a miniature unmanned aerial vehicle (mini-UAV) for meteorological purposes. In *16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence*, 2004.
- [4] Jean-Luc Sorin François Derkx, Jean Dumoulin. Concept de plate-forme mobile instrumentée (pmi) pour l’inspection des ouvrages d’art. In *Colloque Micro-Drones 2002*, 2002. <http://www.supaero.fr/page-perso/aero/synakows/micro-droneaccueil/colloque2002/b>
- [5] Martial Hebert, Charles E. Thorpe, and Anthony Stentz. *Intelligent Unmanned Ground Vehicles : Autonomous Navigation Research at Carnegie Mellon*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [6] Arthur Huber. Death by a thousand cuts : micro-air vehicles in the service of air force missions. Technical report, Air War College, 2001. research.maxwell.af.mil/papers/ay2001/awc/huber.pdf.
- [7] Eric Johnson, Sebastien Fontaine, and Aaron Kahn. Minimum complexity uninhabited air vehicle guidance and flight control system. In *Proceedings of DASC’01*, 2001.
- [8] Claude Pastre. L’observation atmosphérique, quel avenir ? *La Météorologie*, Février 2003.
- [9] RFI. Le monde change, 02/07/04, 2004.
- [10] Akira Sato. Research, development and civil application of an autonomous, unmanned helicopter. Unmanned Vehicle Systems International, www.uvs-international.org.
- [11] Jean-Luc Sorin, Eric Floch, and Yvon Lesage. Projet de surveillance du trafic routier par drones. In *Journées Micro-Drones 2003*, 2003. www.ensica.fr/microdrone/Actes2003/Contributions/S61A_Sorin.pdf.
- [12] Felipe Alves Suana. Étude de l’adaptation de la réglementation de l’aviation civile existante à la problématique d’insertion des drones civils dans l’espace aérien. Master’s thesis, IENAC S01, 2004.

- [13] B. Taylor, C. Bil, and S. Watkins. Horizon sensing attitude stabilisation : A VMC autopilot. In *18th international UAV Systems Conference*, Bristol, UK, 2003.
- [14] USICO. *Workshop on Collision Avoidance and ATC/ATM Integration*, Braunschweig, February 2004. www.usico.org.