



HAL
open science

Véhicules Aériens de type drone Différences avec un aéronef avec pilote à bord

Pierre-Marie Basset, Jean Hermetz

► **To cite this version:**

Pierre-Marie Basset, Jean Hermetz. Véhicules Aériens de type drone Différences avec un aéronef avec pilote à bord. Les drones aériens : passé, présent et avenir. Approche globale, La Documentation Française, 2013, 978-2-11-009376-9. hal-01079838

HAL Id: hal-01079838

<https://hal.science/hal-01079838>

Submitted on 3 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Véhicules Aériens de type drone

Différences avec un aéronef avec pilote à bord

Pierre-Marie Basset, Jean Hermetz,
ONERA, The French Aerospace Lab
basset@onera.fr

Un drone est avant toute chose un objet de haute technicité. Il s'agit d'un système au sens où il intègre différents éléments complexes distincts mais complémentaires et formant un tout cohérent en vue de réaliser une mission. Quatre éléments majeurs constituent un système drone : le Véhicule Aérien (VA), sa charge utile, la station de télé-opération (ou station sol), et les liaisons de données. On y ajoute naturellement ses opérateurs.

Le VA est en quelque sorte le « fer de lance du système ». Il s'agit d'un véhicule ayant certaines capacités de vol permettant de placer et maintenir, en conditions aussi nominales que possible, une charge utile dédiée à une ou plusieurs fonctions nécessaires à la réalisation de missions (capteurs ou autres éléments appelés plus loin « effecteurs » auxquels est consacré un autre chapitre).

Cette partie de l'ouvrage s'intéresse au segment aérien (VA) lui-même, i.e. l'aéronef constitué d'une cellule, de parties sustentatrices (voilures) et propulsives, d'une génération de puissance (usuellement la motorisation, mais aussi des batteries, bien qu'il existe des aéronefs sans moteur tels que les ballons et planeurs), ainsi que d'une avionique embarquée permettant d'assurer le vol automatique (sans pilote à bord), voire autonome.

Les équipements formant l'avionique embarquée propre au drone, (même s'il peut y avoir recouvrement avec une partie de la charge utile dédiée à la mission, certains capteurs parmi les équipements de base pouvant contribuer directement à la mission), seront ici présentés simplement au travers des grandes fonctions qu'ils permettent d'assurer.

L'essentiel de ce chapitre concerne les spécificités des VA de type drone par rapport aux aéronefs avec pilote à bord. Les aspects techniques communs aux VA avec ou sans personne à bord peuvent être consultés dans de nombreux autres ouvrages. Le présent document insiste donc sur ces spécificités qui sont en général partagées à la fois par les drones à voilures fixes ou tournantes.

1 Système embarqué : équipements nécessaires au vol sans pilote à bord

Brièvement sont rappelées ici les grandes fonctions fondamentales qui doivent être assurées par les équipements nécessaires au vol sans pilote à bord. Il s'agit pour l'essentiel des fonctions : pilotage, guidage, navigation, voir-éviter (« sense & avoid » en anglais).

Ces fonctions sont liées entre elles. Elles correspondent à un contrôle du vol plus ou moins long terme. Le pilotage est le contrôle à chaque instant de la dynamique du vol au travers des accélérations, vitesses et angles d'attitude de l'aéronef. Le guidage est le contrôle de la trajectoire de l'appareil sur un horizon de temps intermédiaire entre le court terme du pilotage et le long de terme de la navigation. Cette dernière recouvre le contrôle du cheminement géographique de l'aéronef au cours de son vol au moyen de points particuliers sur une carte (point de départ, points de passage intermédiaires, point d'arrivée). La navigation s'appuie donc sur le guidage qui lui-même implique le pilotage.

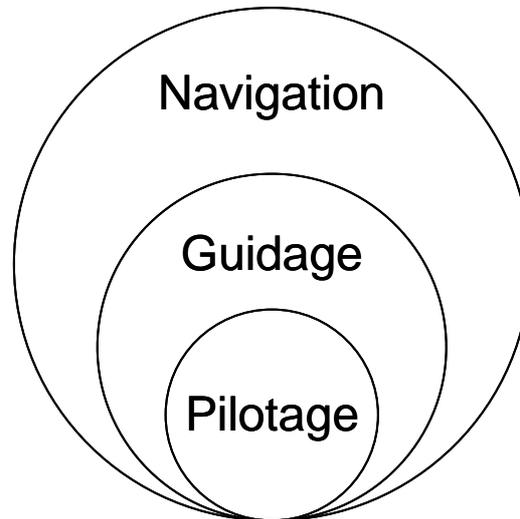


Figure 1 : imbrication des fonctions de base.

Ces fonctions, pour être assurées, ont besoin de moyens de mesure et d'actionneurs. Ces derniers sont des servo-commandes ou autres actuateurs permettant d'agir sur les différentes commandes de l'aéronef.

Le pilotage repose sur les informations fournies par la centrale inertielle. La mesure de la vitesse de l'aéronef relativement à l'air en intensité et direction est souhaitable pour compléter les informations nécessaires au pilotage. Tout aéronef est soumis à des forces et moments aérodynamiques qui dépendent de sa vitesse relative à l'air. En pratique les mesures de vitesse air sont réalisées par sonde Pitot sur les avions. Elles sont plus difficiles sur un aéronef à voilures tournantes (giravion) à cause des perturbations générées par le souffle des rotors (en particulier par le rotor principal dans le cas d'un hélicoptère) et à cause des basses vitesses. En effet en dessous d'une certaine vitesse, les tubes Pitot ne donnent plus une information fiable. D'autres techniques ont été étudiées faisant appel à d'autres capteurs (capteurs utilisant un autre principe que la mesure d'une différence de pression, par exemple : vélocimétrie laser ou mesure de passages de tourbillons au moyen de sondes à ultrason, etc.) associés ou non à une méthode algorithmique hybridant la mesure de la vitesse air avec d'autres mesures (celles de la centrale inertielle notamment).

La mesure de la vitesse air aux basses vitesses pour les giravions (typiquement en dessous d'environ 45km/h pour donner un ordre de grandeur) est une problématique non encore résolue. Bien souvent les drones à voilures tournantes font l'impasse sur cette mesure.

Le guidage et la navigation requièrent la mesure des positions en tant que coordonnées géographiques (X, Y, Z). Elle sont évaluées bien souvent à l'aide d'un GPS (« Global

Positioning System »), i.e. un système de positionnement par satellite dont il existe différents types (simple, différentiel, etc.). Cette localisation géographique est en générale complétée par la mesure de l'altitude pression au moyen d'un baromètre voire par celle de la hauteur par rapport au sol (par exemple au moyen d'une sonde LASER ou SONAR). Par ailleurs, on hybride généralement la centrale inertielle (IMU pour Inertial Measurement Unit) avec les informations GPS et, une information d'altitude barométrique, pour disposer d'un vecteur d'état (vitesses et positions) présentant des biais les plus faibles possibles.

Outre les équipements précédents, l'évitement d'obstacle nécessite un ou des capteurs pour détecter les obstacles fixes ou mobiles (bâtiments, végétations, poteaux et lignes à hautes tension, autre aéronef, etc.) suffisamment tôt (donc loin en avant) pour permettre d'éviter la collision. Le type de capteur utilisé pour cette fonction anticollision peut être par exemple une caméra frontale, un LIDAR, un LASER ou un RADAR millimétrique, ... Il existe également des solutions coopératives, mais dont l'usage est essentiellement possible dans le trafic aérien civil (par exemple le système d'alerte de trafic et d'évitement de collision TCAS (« Traffic Collision Avoidance System »)).

Au-delà de ces fonctions de base, la fonction de décision autonome est intrinsèquement liée à la notion de drone. Ce degré d'autonomie est variable entre différents drones et peut-être modulable pour un même drone. Elle peut recouvrir au minimum le traitement d'urgence d'une panne majeure telle que la perte de la liaison de données ou plus largement la gestion de la mission et de capteurs, la reconfiguration en cas de panne, ... Un chapitre plus loin dans ce livre est consacré à cette fonction clef liée à la définition même du drone.

Néanmoins on peut d'ores et déjà indiqué ici que l'absence de pilote à bord suppose que son intelligence, sa compétence et ses sens se trouvent dans une certaine mesure remplacés ou tout au moins déportés. A ce titre, on distingue les appareils télé-opérés (RPV ou « Remotely Piloted Vehicules ») et RPAS pour « Remotely Piloted Aerial System ») des appareils automatiques, qui peuvent en outre être dotés d'une certaine autonomie.

Dans tous les cas, le VA emporte à bord des calculateurs qui lui permettront d'assurer une stabilisation. Le "pilote", qu'il soit à bord (donc sous forme d'un calculateur assurant la direction du vol), ou au sol (et dans ce cas il s'agira d'un opérateur-pilote ou télépilote), délivre un ordre de haut niveau, ou consigne de type "prendre un cap", "tenir une pente", "maintenir une vitesse". Le calculateur de bord élabore, en fonction de sa connaissance de l'état du VA, de son attitude, sa vitesse, de tous ses paramètres de vol qui sont observés par des capteurs dédiés (sonde anémométrique, centrale inertielle, GPS, etc.), les ordres sur les gouvernes et leur asservissement en boucle fermée pour obéir à ces ordres de guidage de haut niveau.

Si l'on est sur un VA automatique, ce guidage est alors intégré dans une boucle de navigation, qui vient assurer, via généralement la succession de points de passage traduisant un "plan de vol", ou profil de mission, la conduite de celle-ci en élaborant les ordres de guidage au fur et à mesure du déroulement de cette mission. Ces ordres peuvent être pré-programmés, avant mission, ou adaptés durant son déroulement : dans ce cas, c'est un rôle possible d'un opérateur sol, ou bien d'une capacité d'autonomie décisionnelle embarquée du véhicule.

Cette description succincte de l'avionique, essentiellement faite ici pour en montrer l'impact sur l'architecture générale du vecteur aérien, en montre toute la complexité : même si un pilote exerce ce pilotage à travers des capteurs de même nature que ceux décrits, les fonctions de

guidage et de navigation, et d'autonomie dans la gestion de la mission, lui sont généralement dévolues (tout en étant généralement aidé par des équipements comme le FMS – « Flight Management System »). Là, son absence à bord est palliée par des calculateurs qui présentent l'avantage d'être déterministes, fiables, insensibles aux manœuvres et, dans une certaine mesure, aux conditions environnementales, et surtout décomposables en éléments pouvant être répartis dans la cellule. Ils n'ont en revanche que des capacités d'initiative limitées à ce jour. En outre, d'un point de vue installation à bord, les équipements avioniques, dans une moindre mesure que ceux dédiés à la mission, nécessitent de la puissance électrique, et génère de l'énergie thermique. Cela vient s'ajouter aux bilans de puissance et thermiques dus aux équipements de mission, lesquels sont généralement nettement plus gourmands sur des VA de type MALE (Moyenne altitude Longue Endurance) ou HALE (Haute Altitude Longue Endurance), mais ces proportions entre équipements avioniques ou mission changent notablement pour des mini-drones et encore plus pour des microdrones.

2 Spécificités par rapport aux aéronefs avec pilote à bord

Les aéronefs de type OPV : « Optionally Piloted Vehicle » peuvent opérer sans ou avec pilote à bord. L'intérêt est d'une part de pouvoir profiter de la possibilité de la présence d'un pilote de sécurité durant les phases de mise au point du système et pour certaines missions, d'autre part de pouvoir adapter un VA déjà conçu pour le vol avec pilote à bord. A titre d'exemple on citera le cas du Little Bird de Boeing (ou « Unmanned Enhanced Little Bird » UMELB) qui est un hélicoptère dérivé du MD530-FF à l'exception du rotor principal à 6 pales et du moteur qui proviennent du MD600-N. Dans ce cas la « dronisation » se limite pour l'essentiel à l'adaptation et au complément des systèmes embarqués dans un VA existant.

Dans tous les autres cas (hors « OPV » et de façon plus générale sans occupant pilote ou passager à bord), un VA de type drone peut se distinguer d'un aéronef conventionnel, embarquant des personnes, par les aspects de conception suivant :

- la taille : car il peut alors se décliner à différentes échelles en particulier de taille réduite (mini ou micro drones) présentant l'intérêt d'une discrétion ainsi que d'une facilité de transport et de mise en œuvre accrues ;
- la forme ou plus généralement la gestion du volume et de la visibilité : le cockpit, avec ses instruments, sa verrière et toutes les contraintes associées est supprimé ouvrant des degrés de liberté dans l'organisation topologique des équipements de toutes natures ;
- les capacités : car un drone peut s'affranchir des limites humaines qu'impose la présence de personne(s) à bord (accélérations très élevées, conditions de pression et de température, endurance ou plus généralement capacités aux missions de type « Dull-Dirty-Dangerous ») ;
- le concept : certains appareils de par leur architecture ou leur concept de vol sont plus facile à opérer en version système de drone plutôt qu'en version avec pilote à bord ;
- dans une certaine mesure, les règles de conception : dans le cas d'un drone, l'attrition n'a plus le même sens, tandis que les aspects relatifs à la certification sont essentiellement liés non aux personnes embarqués mais uniquement aux zones survolées et à l'insertion dans le trafic aérien civil (aspect lui-même fortement lié à la nature des missions dévolues au drone considéré).

2.1 Tailles

Dans le domaine des dimensions, les drones se déclinent d'un bout à l'autre des échelles, avec dans les grands véhicules le Northrop Grumman RQ 4 Global Hawk et ses 36 m d'envergure, soit de dimensions de même ordre que celles d'un Airbus A320, et à l'autre extrémité des aéronefs de taille comparable aux gros insectes.

Si le premier cas correspond à un appareil tout à fait semblable, du moins dans son apparence, à un avion piloté, bien évidemment il n'en va pas de même pour le second : l'absence de personne à bord permet de s'affranchir de cette contrainte de "volume minimal" et donc de concevoir des VA de taille réduite, directement adaptés à un emploi, des contraintes de discrétion, de transport, de mise en œuvre qui les rendent opérables par un seul opérateur comme un outil de base tel qu'une paire de jumelle, par exemple.

Ainsi, cette taille peut en principe être adaptée à l'application souhaitée. En pratique il existe des limites technologiques, dans le domaine des petites dimensions, qui font l'objet de nombreuses recherches de façon à être sans cesse repoussées. On citera notamment le rendement propulsif, où se conjugue d'une part l'efficacité aérodynamique, peu connue à ces échelles correspondant à des très faibles nombres de Reynolds (quelques centaines tout au plus), d'autre part celle des organes électriques et électroniques.

Le terme mini-drone est utilisé pour des VA pouvant être transportés par une seule personne. Par exemple par un fantassin dans un sac à dos comme dans le cas du CPX4 développé par l'INPG au cours du concours drones miniatures 2005 sous l'égide de la DGA avec le soutien technique de l'ONERA. Le cahier des charges de ce concours universitaire international imposait que la dimension maximale du VA ne dépasse pas 70cm.

Le CPX4 est un exemple parmi d'autres de VA de type quadricopter c'est-à-dire comportant quatre rotors montés aux quatre extrémités d'une structure en croix.

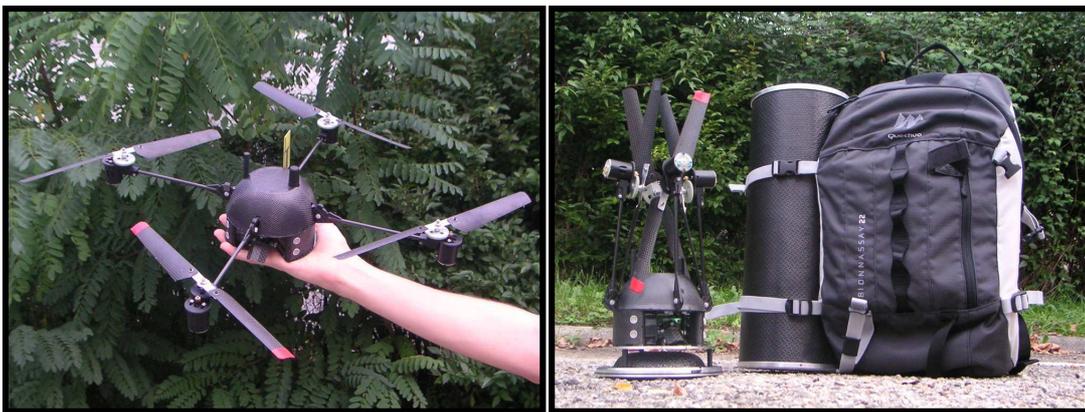


Figure 2 : drone CPX4 en position déployée puis repliée.

Les termes micro-drone ou nano-drone sont utilisés pour désigner des VA de taille très réduite pouvant tenir dans une main. Ce domaine de recherche de miniaturisation est fortement inspiré du biomimétisme consistant à prendre exemple sur la nature. L'intérêt est double, d'une part se fier à la nature qui au cours de millions d'années a sélectionné les concepts de vol les plus adaptés aux faibles dimensions, d'autre part se fondre dans la nature : un VA ressemblant à un oiseau ou un insecte sera d'autant plus discret.

Des drones de la taille d'une mouche appelés Robofly (« robot mouche ») sont étudiés notamment aux USA par exemple par l'université de Berkeley. Leur poids varie autour de 50 mg (milligrammes) pour une envergure d'environ 3 cm. Des progrès ont été faits dans la compréhension de la dynamique du vol des insectes. Cependant l'effort de miniaturisation est tel qu'il freine les concrétisations et compromet leur intérêt à cause des limitations que cela impose sur les capteurs embarqués, les liaisons de données et l'autonomie en terme de génération de puissance.

Une taille un peu plus grande a permis plus de réussite comme l'illustre le cas du Nano Humingbird, drone à ailes battantes inspiré de l'oiseau colibri (e.g. [1]). Il a été développé pour répondre aux objectifs du programme « Nano Air Vehicle » de l'agence étatique américaine DARPA (« Defense Advanced Research Projects Agency ») imposant une taille maximale de 7,5 cm, une masse maximale de 10 g incluant une charge utile de 2 g et pouvant voler du vol stationnaire jusqu'à 10 m/s.



Figure 3: Nano Humingbird drone à ailes battantes [1]

2.2 Formes

La diversité des drones [2] montre à quel point la suppression du pilote à bord relâche des contraintes de conception et permet une adaptation de l'architecture du porteur à sa mission.

En effet, la présence d'un¹ pilote à bord se traduit notamment en terme de contraintes de visibilité, principalement vers le sol pour les phases de décollage et atterrissage, imposant la présence d'un cockpit, et un positionnement généralement à l'avant du véhicule, là où justement les principales charges utiles, si elles sont notamment formées de capteurs orientées vers le sol, trouveraient fort naturellement leur place. Un cockpit est en outre difficile à rendre discret d'un point de vue signature électromagnétique, tandis que le compromis entre qualité optique, visibilité et aérodynamique se fait généralement au détriment du dernier aspect. Ainsi, son absence autorise un design de cellule plus aérodynamique.

Pour les UCAV (« Unmanned Combat Air Vehicle ») à voilure fixe, l'absence de pilote prend, vis-à-vis du relâchement des contraintes de forme, tout son intérêt en autorisant des formes adaptées à des critères de discrétion électromagnétique : forme de fuselage, fuselage et ailes noyées, entrées d'air masquées situées sur le dessus de l'appareil, qui seraient mal alimentées si elles étaient dans le prolongement d'un cockpit, etc.

¹ Et dans le plan de symétrie. Même si des concepts ont été étudiés et construits par le passé, il s'avère très difficile à un pilote de supporter les conditions d'ambiance d'un poste de pilotage décalé de l'axe de roulis.

A titre d'exemple le Pegasus X47A illustre la suppression du cockpit et l'intégration ailes-fuselage dans une forme continue (concept de Blended Wing Body). On le retrouve également dans le Neuron de Dassault Aviation.

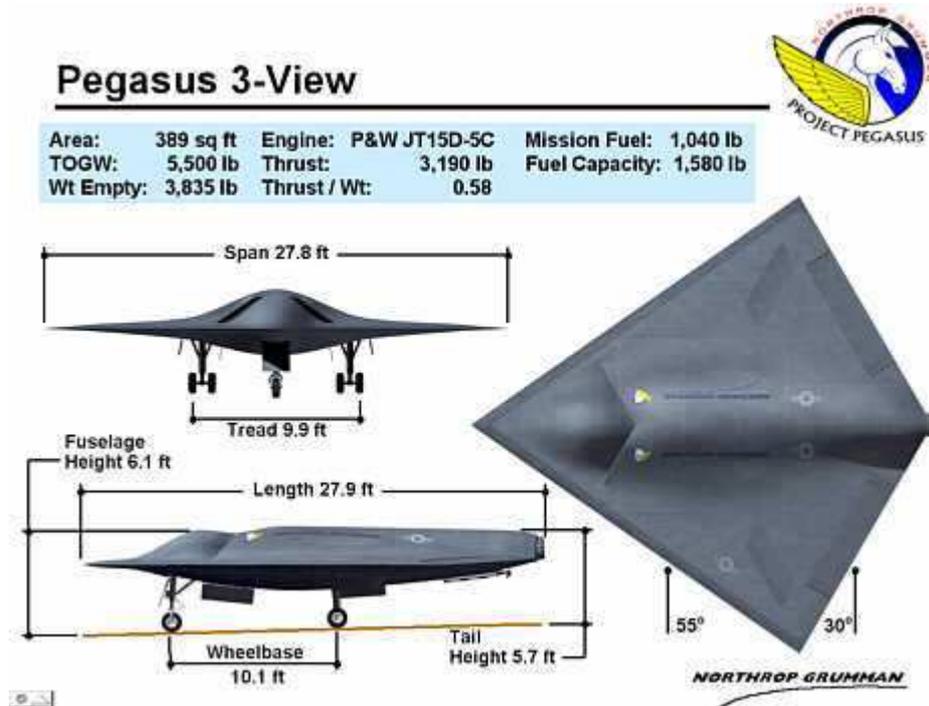


Figure 4 : Drone de combat X-47 de Northrop Grumman

Le cas du Humingbird A160, drone hélicoptère de grande endurance (Figure 5), est un autre exemple montrant un design du fuselage particulièrement aérodynamique en l'absence de cockpit.



Figure 5 : Humingbird A160

Enfin, l'absence de pilote à bord évite ou limite l'installation d'équipements spécifiques comme les sièges, tableaux de bord, le conditionnement d'air, la pressurisation, l'alimentation en oxygène, ainsi que certains renforts de fuselage.

Mais c'est essentiellement en supprimant cette "charge" en avant de la cellule que le gain est le plus important : comme dit juste auparavant, l'absence d'équipage libère la zone avant où se

positionnent avec bonheur des capteurs, des antennes et autres moyens d'écoute qui sont ainsi dans un environnement protégé en même temps que dégagés de tout obstacle.

A titre d'exemple, de nombreux drones actuels, de type MALE ou HALE, présentent une architecture de type "capteurs à l'avant", dans une baie dédiée, et motorisation arrière. La Figure 6 illustre cette architecture sur le Global Hawk.

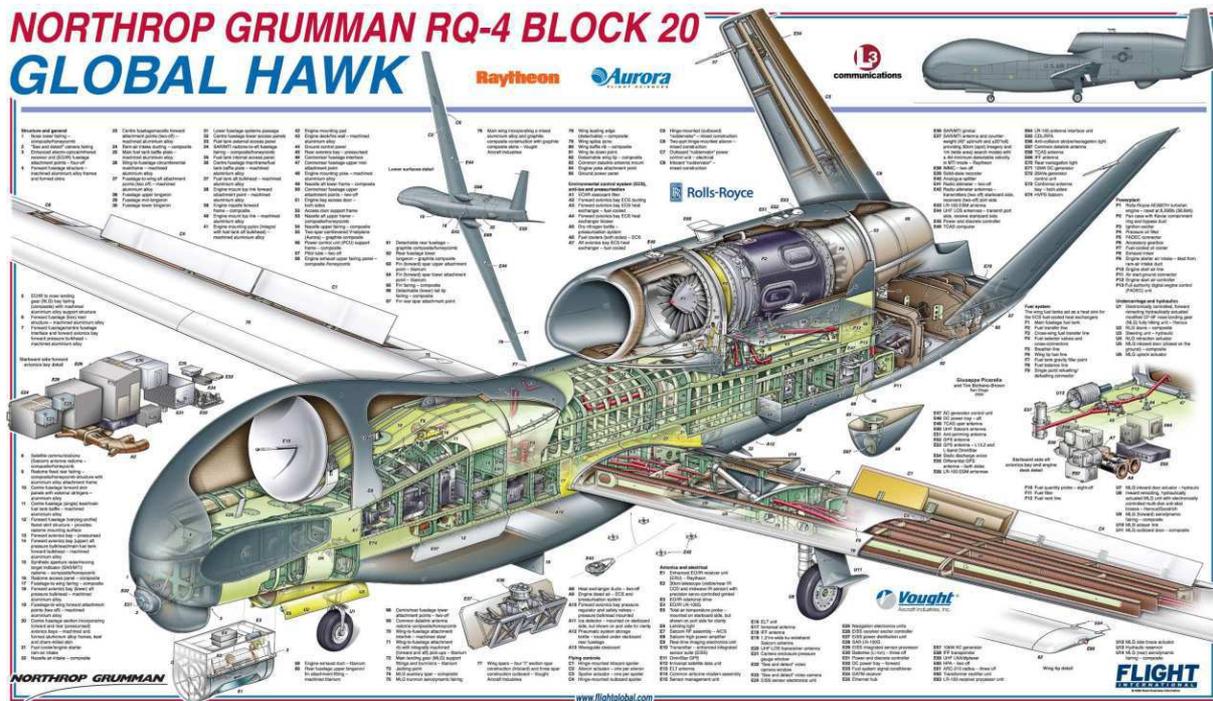


Figure 6 : écorché du Global Hawk Block 20 (Flight International)

Cette disposition assure un positionnement idéal des capteurs, à l'avant, et un contrebalancement, pour l'équilibre des masses, par la motorisation. La formule aérodynamique, pour les appareils à voilure fixe, reste généralement assez traditionnelle pour des appareils de ce type : voilure à grand allongement, gage de finesse élevée et donc d'un excellent rendement aérodynamique pour assurer une endurance élevée, et empennage arrière pour la stabilisation et le contrôle longitudinal.

2.3 Capacités du vecteur aérien

L'expérience aéronautique permet de répondre de façon assez complète aux exigences de missions qui sont déclinées généralement, pour la partie vecteur aérien proprement dite, en termes classiques de performances aéronautiques de type rayon d'action, endurance, auxquelles se rajoutent des performances plus opérationnelles telles que vitesse ou taux de montée, capacité de manœuvre, performances à basse vitesse.

La deuxième notion essentielle constitue bien évidemment, la charge utile elle-même, et ses contraintes d'emploi qui viennent compléter les exigences en performances énoncées ci-avant, notamment en terme de vitesse sur trajectoire, d'altitude de vol, de stabilité de la plateforme.

Ces différentes spécifications guident généralement le choix de la formule aérodynamique du véhicule, d'une part, de sa motorisation, d'autre part.

Pour le premier point, le rayon d'action et l'endurance conduisent à des voilures à grand allongement. Une bonne stabilité et la maîtrise du comportement à basse vitesse militent généralement pour une configuration empennée classique (empennage en V ou en croix).

Pour le second, les critères d'autonomie et de vitesse (croisière, montée, endurance) se conjuguent avec des notions de simplicité, de maintenance, pour permettre de réaliser un choix entre une motorisation de type turbofan, simple, efficace mais de consommation spécifique relativement élevée, ou des solutions reposant sur des moteurs à piston, généralement turbocompressés, pour le domaine des drones de petite capacité, ou bien des turbines pour des MALE. Dans ce choix de motorisation, l'altitude de mission, également, joue bien évidemment un rôle prépondérant. On notera que :

- les turbofans sont généralement issus de l'aviation classique, générale ou d'affaire, et sont donc certifiés généralement jusqu'à 45 000 ft. Au-delà, des essais, voire des développements spécifiques s'imposent.
- Les moteurs à piston perdent leurs performances rapidement en altitude, nécessitant le recours à la compression à l'admission pour contrebalancer la raréfaction de l'air. Ces compresseurs représentent des systèmes relativement complexes, qu'il faut généralement compléter avec des échangeurs pour maîtriser l'augmentation de la température de l'air. Ces échangeurs sont en eux-mêmes des sources de traînée et de complexité.

Enfin, les drones, notamment ceux à voilure fixe de taille conséquente (MALE et HALE), sont amenés à être opérés dans des environnements mêlant trafic civil et militaire. De ce fait, ils doivent assurer une capacité à s'insérer dans le trafic aérien contrôlé, et plus généralement être conformes à un certain nombre d'exigences réglementaires, en cours d'établissement. Il est prématuré à ce jour de préciser plus, d'un point de vue performances, les exigences que cet impératif de compatibilité peut introduire, mais en tout état de cause la similarité des performances avec les aéronefs évoluant dans le trafic aérien est une bonne base de réflexion.

Au-delà de ces aspects généraux, le propos est ici de souligner les différences de capacités i.e. performances entre les Véhicules Aériens habités ou de type drone. L'absence de personne à bord permet au drone de s'affranchir des limites humaines ce qui le rend plus apte à certaines missions (« D³ : Dull-Dirty-Dangerous », cf. ci-après), mais cela doit se traduire par la prise en compte de certaines spécificités dans sa conception.

« Dull » : les drones sont par nature plus aptes aux missions fastidieuses, nécessitant une grande endurance ou/et un déroulement systématique précis mais ennuyeux, qu'il est plus efficace de confier à un robot volant qu'à un pilote susceptible de déconcentration. On citera par exemple les missions de surveillance sur une longue durée, les missions d'inspection de sites ou d'ouvrages qui imposent un balayage systématique précis et répétitif, ...

Les conséquences sur la conception du VA concernent son autonomie accrue en termes d'endurance (bilan énergétique minimisant la puissance requise et maximisant la capacité énergétique embarquée), de traitement et/ou stockage des informations acquises, de gestion des cas de pannes, ...

« Dirty » : il s'agit de missions pour lesquelles il est préférable de ne pas exposer un pilote à des risques liés à la pollution de l'environnement survolé, par exemple pour l'épandage de traitement chimique, pour l'intervention sur des sites nucléaires, ...

La conséquence sur le VA concerne sa protection et en particulier celle des équipements vis-à-vis de la pollution à laquelle il est exposé (renforts, blindages ou autres protections spécifiques contre la corrosion, les perturbations électromagnétiques ou les rayonnements [ionisants](#) etc.).

« Dangerous » : il peut s'agir de mission civiles ou militaires susceptibles d'exposer un pilote ou un équipage à un danger comme par exemple les missions de reconnaissance ou d'intervention en milieu hostile dans le cas d'un conflit, la surveillance ou l'inspection de zones à risques (incendies, volcans, etc.).

Les conséquences sur le VA dépendent naturellement du risque encouru. Il faut équiper le drone de capteurs lui permettant de mesurer les paramètres qui à partir de certains seuils peuvent nuire à son intégrité, au fonctionnement des équipements et à la bonne réalisation de sa mission. Par exemple, un drone peut potentiellement être doté de capacités d'accélération accrues, encore faut-il les prendre en compte au moment de sa conception. Outre des structures, matériaux, fixations et renforts permettant de supporter les forts facteurs de charge, il faut prévoir des accéléromètres capables de fonctionner dans toutes les situations, ainsi que des algorithmes permettant d'éviter le dépassement de limites préétablies au moyen de boucles d'asservissement automatique. De même vis-à-vis des autres dangers, comme par exemple les élévations de température, etc., pour lesquels il faut prévoir de façon générale des protections à la fois au niveau de la structure du VA, des capteurs et de l'automatique embarquée.

2.4 Concepts

Même si en théorie il est souvent possible d'adapter un Véhicule Aérien pour qu'il puisse accueillir un pilote ou un équipage, certains concepts de VA sont plus faciles à mettre en pratique en version drone.

Au-delà des différences de forme, de taille et performances déjà évoquées, cela peut s'expliquer par une architecture de VA peu propice à accueillir des personnes à bord. Par exemple, un VA comprenant deux rotors coaxiaux contrarotatifs montés au-dessus et en dessous d'une cellule centrale, est plus facile à mettre en œuvre en version drone qu'en version avec pilote à bord.

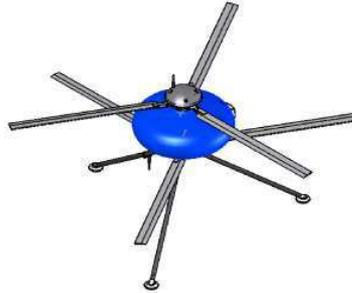


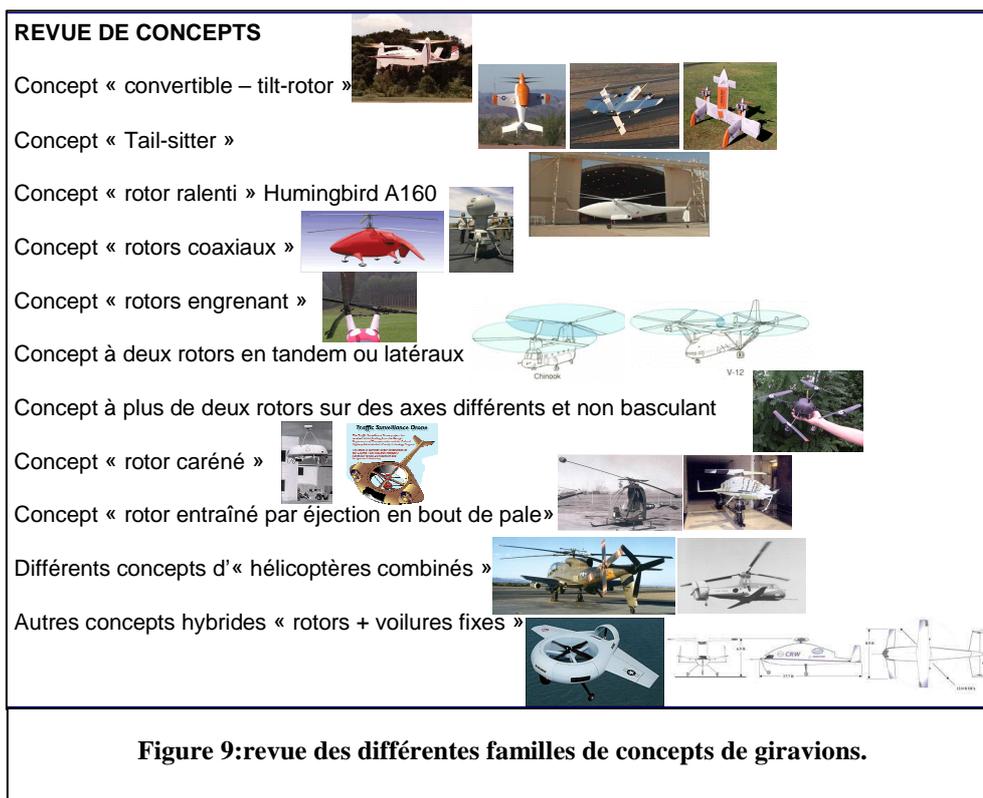
Figure 7: concept de drone axisymétrique birotors coaxiaux.

De même des concepts utilisant un seul système caréné enserrant à l'intérieur un ou des rotors coaxiaux avec ou sans volets de contrôle et une motorisation sont de façon quasi unanime déclinés sous forme de drone (e.g. Figure 8), l'architecture de ces VA se prêtant guère à l'intégration d'un pilote.



Figure 8 : exemples de VA à rotors carénés (figure extraite de [3]).

Plus généralement l'avènement des drones a permis de revisiter des concepts de VA explorés par le passé, mais qui avaient été laissés de côté face à une difficulté technique ou faute d'un bilan positif entre d'une part leur complexité, leur coût et leur dangerosité et d'autre part leur réel intérêt applicatif. Avec l'avènement des drones, les coûts et risques de développement deviennent moins prohibitifs, d'où l'engouement et le fleurissement actuel de projets. On assiste à une « explosion » des concepts de VA et en particulier des giravions du fait de l'intérêt de leur capacité de décollage et atterrissage verticaux, vols stationnaires et basses vitesses. La Figure 9 montre un synoptique non exhaustif des différents types de giravions ou aéronefs à rotor.



Il s'agit d'aéronefs qui ont l'avantage de s'affranchir de moyens lourds pour leur décollage et atterrissage (piste ou autre moyen tel que catapulte). La grande majorité de ces aéronefs possède des voilures tournantes (un ou des rotors), quelques uns des voilures battantes. Outre la capacité VTOL « Vertical Take-Off and Landing », ce type de voilure leur confère, à un coût énergétique raisonnable, une capacité de vols stationnaires et basses vitesses particulièrement utiles à certaines missions. Ils peuvent voler dans toutes les directions (vols avant/arrière, latéraux, verticaux) et sont souvent dotés d'une grande manœuvrabilité.

Le cas des « tail-sitter » illustre bien cette tendance à revisiter en version drone des concepts explorés par le passé qui avaient posé problème en version avec pilote à bord. Il s'agit d'aéronefs combinant des voilures tournantes pour les décollages et atterrissages verticaux ainsi que des voilures fixes pour les vols en translation horizontale. La transition entre les deux phases de vol est particulièrement délicate, ainsi que l'atterrissage. Un décrochage volontaire doit être réalisé pour amener l'axe de l'appareil d'une direction verticale à une direction horizontale. La virtuosité du pilote pour effectuer ces manœuvres risquées a utilement été remplacée par une automatisation complète de ces trajectoires à la fois difficiles à réaliser et à supporter par un pilote humain.

2.5 Règles de conception

Les différents aspects évoqués précédemment (taille, forme, performances, concepts) sont autant de « degrés de liberté » qui peuvent être adaptés au type de mission à réaliser avec des « variations » beaucoup plus larges que pour un aéronef avec pilote à bord. Le jeu des

possibles est plus vaste. Certains constructeurs et organismes de recherches comme l'ONERA ont développé des outils pour explorer en simulation numérique ce champ des possibles (e.g. [4] pour les voilures fixes et [5] pour les giravions). Il s'agit de conception préliminaire évaluant différents concepts et prédimensionnements au regard de différents critères : performance opérationnelle, impact environnemental, réalisme économique, ...

Cette optimisation d'un VA pour un ensemble de missions doit évidemment aussi tenir compte des contraintes réglementaires en matière de certification aéronautique.

Dans le domaine civil, l'arrêté du 21 mars 2007 ne concernait que l'aéromodélisme. Après une consultation des usagers entre 2009 et 2010, la DGAC a fait évoluer les textes pour une réglementation plus large et plus précise relative « à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent », (cf. arrêté du 11 avril 2012 [6]).

Dans le domaine militaire, un code de certification a d'abord été établi pour les drones à voilures fixes (USAR : « Unmanned Aerial Vehicle Systems Airworthiness Requirements », [7]) à partir de l'adaptation de la norme de certification de l'EASA (« European Aviation Safety Agency ») « Certification Specifications » CS-23. La DGA en concertation avec l'industrie et l'ONERA (groupe de travail USAR-RW pour « Rotary Wings ») a ensuite pris l'initiative d'une telle démarche pour les drones à voilures tournantes à partir essentiellement de la CS-27. L'harmonisation de cette première version d'un référentiel de navigabilité des systèmes de drones à voilures tournantes au niveau de l'OTAN a été réalisée en trois ans (2009-2012) sous le pilotage de la France. Sa ratification est attendue pour le printemps 2013. Il deviendra alors le STANAG 4702 [8].

Références

1. Matthew Keennon, Karl Klingebiel, Henry Won, Alexander Andriukov, « Tailless flapping wing propulsion and control development for the Nano Humingbird Micro Air Vehicle », Presented at the American Helicopter Society Future Vertical Lift Aircraft Design Conference, January 18-20, 2012, San Francisco, California. Copyright © 2012 by AeroVironment Inc. Published by American Helicopter Society International, with permission.
2. UAS RoadMap 2005-2030, DoD, USA
3. J. Fleming, T. Jones, J. Lusardi, P. Gelhausen, D. Enns, “Improved Control of Ducted Fan VTOL UAVs in Crosswind Turbulence“, Presented at the AHS 4th Decennial Specialist’s Conference on Aeromechanics, San Francisco, California, January 21-23, 2004.
4. C. Blondeau, G. Carrier, S. Defoort, J. Hermetz, P. Schmollgruber, “Toward multi-level, multi-fidelity, multi-disciplinary optimization at Onera”, RTO MP AVT 173 Workshop on “Virtual Prototyping of Affordable Military Vehicles Using Advanced MDO”, Sofia, Bulgaria, 16th to 20th May 2011.
5. P.-M. Basset, A. Tremolet, and al., “C.R.E.A.T.I.O.N. the Onera multi-level rotorcraft concepts evaluation tool: the foundations,” in *AHS Future Vertical Lift Aircraft Design Conference, San Fransisco, United States*, 18-20 January 2012.
6. DGAC, Arrêté du 11 avril 2012 relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent.
7. OTAN-NATO, « Unmanned Aerial Vehicle Systems Airworthiness Requirements », STANAG 4671, Edition 1, September 2009.
8. OTAN-NATO, “Rotary Wing UAV Systems Airworthiness Requirements (USAR-RW)”, Référentiel de navigabilité des systèmes de drones à voilures tournantes, futur STANAG 4702 Ed.1, 2013.