

DRONES SOLAIRES : LA QUETE DU VOL PERPETUEL

Olivier Montagnier¹

Introduction

Le vol « perpétuel » est un rêve qui deviendra peut-être un jour une réalité. Cet objectif sera atteint grâce à l'utilisation d'une source inépuisable d'énergie : l'énergie solaire. Le principe de fonctionnement sera relativement simple. Le jour, des cellules photovoltaïques collées à la surface du vecteur capteront l'énergie nécessaire à la propulsion, aux batteries et aux instruments. La nuit, les batteries restitueront l'énergie emmagasinée à la propulsion et aux instruments. Ces aéronefs qui pourront voler plusieurs années sans se poser seront très certainement des drones.

Ce chapitre s'intéresse au développement de ces aéronefs et à leur faisabilité dans le futur. Il se focalise sur le cas des drones à voilure fixe même si a priori toutes les formes de drone sont envisageables (voilure fixe, voilure tournante, aérostat ou hybride). Après une introduction sur les applications potentielles de ces aéronefs, il sera présenté leur développement depuis la découverte des cellules photovoltaïques jusqu'à nos jours. Les difficultés liées à la conception de tels drones seront ensuite mises en évidence. Enfin, un exemple de conception démontrera la nécessité de maturation de la technologie.

Les applications potentielles

L'intérêt majeur des futurs drones solaires devrait être une endurance extrêmement longue. Seule leur maintenance nécessitera un retour sur terre. Il est aisé d'imaginer que cette persistance sera possible si le drone est capable de capter le maximum d'énergie solaire disponible, quel que soit les conditions météorologiques. Il sera alors inéluctablement de voler dans la stratosphère pour se positionner au-dessus des nuages, situés entre 0 et 13km d'altitude (fig. 1). De plus, à ces altitudes, le drone sera peu vulnérable et situé dans un espace totalement libre de trafic aérien, les avions de lignes croisant aux alentours de 12km d'altitude. Ces altitudes permettront aussi de diminuer l'atténuation atmosphérique de l'énergie solaire. De ces deux propriétés, haute altitude et longue endurance (HALE), il résulte deux applications pour les drones solaires : la surveillance et le relais de télécommunication, les deux à des fins militaires ou civiles. A terme, ces drones

¹ Equipe « Dynamique du vol », Centre de recherche de l'armée de l'air, Normalien et Docteur en Mécanique des Solides.

pourraient remplacer une partie des satellites des orbites basses. Les satellites d'observation comme Helios ou de télécommunication comme les constellations Iridium et GlobalStar sont situés sur ces orbites (entre 300 et 2000 km) et repassent sur zone au bout d'un certain nombre de jours. Contrairement à ces satellites, le drone permettrait une permanence sur zone. Il « suffira » d'être capable de voler à la vitesse maximale des vents. Tandis que les satellites géostationnaires eux sont fixes par rapport à la terre mais très loin (36 000 km) pour l'observation et aussi extrêmement coûteux. Enfin, une étude comparant les coûts d'exploitation d'un drone solaire par rapport aux drones MALE à propulsion conventionnelle, précise que ces drones solaires (750 euros par heure de vol) seraient 4 fois plus rentables qu'une flotte de drones MALE (3060 euros par heure de vol) réalisant la même mission².

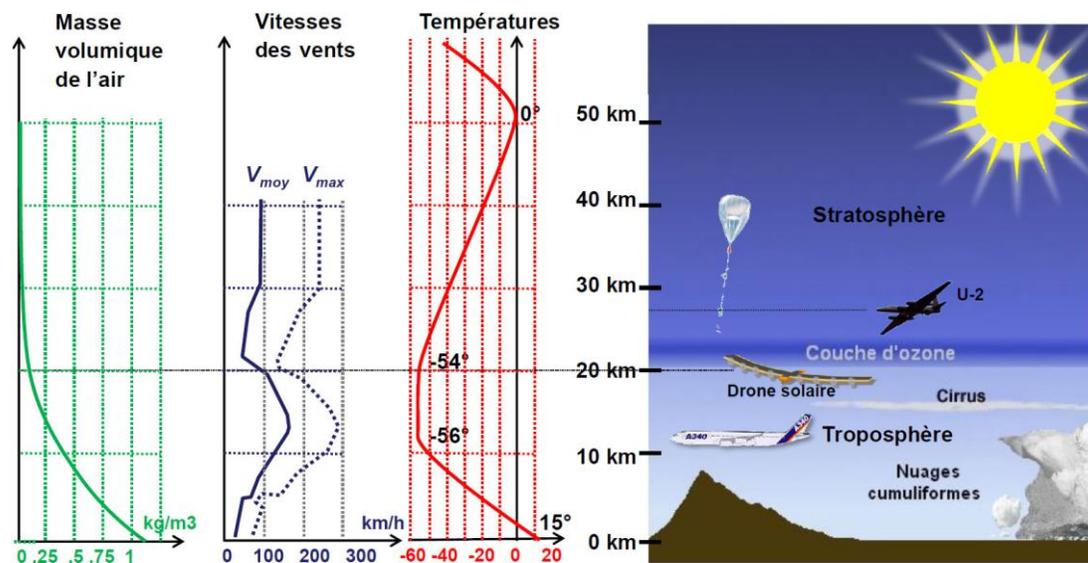


Figure 1 : Positionnement du drone solaire dans l'atmosphère : au-dessus des nuages, du trafic aérien et des forts vents (CRéA).

A 20 km d'altitude, malgré la rotondité de la terre, le drone peut émettre sur un rayon de 500 km. Avec un émetteur adapté, seulement 4 à 5 plateformes pourraient couvrir l'ensemble du territoire français (fig. 2). Les hautes altitudes permettent entre autres de se trouver au-dessus du « jet stream » c'est-à-dire dans une zone relativement calme en vent (fig. 1). Ces altitudes ont toutefois deux désavantages. Les températures très froides qui fragilisent de nombreux matériaux et la très faible densité de l'air qui rend la sustentation difficile. L'explication de ce dernier point sera précisée par la suite.

D'autres applications sont envisagées pour les drones solaires parmi lesquelles

² Cestino Enrico, « Design of solar high altitude long endurance aircraft for multi payload & operations », Aerospace Science and Technology, 2006, vol. 10, p. 541–550.

on trouve : la surveillance environnementale (pollution pétrolière, pollution nucléaire, etc.), la détection de risques particuliers (feux de forêts, transport illicite de matériaux radioactifs, etc.), les sciences de la terre (météorologie, mesure de la couche d'ozone, etc.) et l'astrophysique (plateforme de mesure à haute altitude).



Figure 2 : 4 à 5 drones solaires pourraient couvrir l'ensemble de la France (CReA).

Une technologie récente et complexe : de 1954 à nos jours

Historique et records

L'idée du vol solaire est née en 1954, année de la découverte des cellules photovoltaïques. Le concept revient au Dr August Raspet³. Il propose d'installer ces cellules sur l'extrados des ailes d'un genre de planeur et d'utiliser une propulsion électrique (moteur électrique couplé à une hélice). Le développement ne nécessite, dès lors, que la maturation de la technologie photovoltaïque.

Dix-huit ans après, lors d'un colloque du MIT⁴, des chercheurs proposent de réexaminer cette idée. Le 4 novembre 1974, le drone Sunrise I, d'une envergure de 9,7 m et d'une masse de 12 kg, réalise le premier vol solaire en Californie. En 1975, son successeur le Sunrise II (fig. 3) atteint l'altitude record de 5,2 km⁵. Le développement des premiers drones solaires est alors étroitement lié au développement des avions solaires tels que Solar One (GB), Solar Riser (US) et Solair I (DE). Le Gossamer Penguin développé par AeroVironment (US) (fig. 3) sera le premier avion piloté, volant uniquement à l'énergie solaire. Il effectuera un vol de 3 km en Californie le 7 août 1980. De ce projet naît le Solar Challenger (fig. 4). Il possède une envergure de 14,3 m et une masse à vide de seulement 90 kg⁶. Emportant

³ http://en.wikipedia.org/wiki/August_Raspet

⁴ Massachusetts Institute of Technology

⁵ Robert J. Boucher, « Sunrise, the World's First Solar-Powered Airplane », *Journal of Aircraft*, 1985, vol. 22, p. 840-846.

⁶ P.B. MacCready, P.B.S. Lissaman, W.R. Morgan & J.D. Burke, « Sun-Powered Aircraft Designs », *Journal of Aircraft*, 1983, vol. 20 (6), p. 487-493.

une plus grande quantité de cellules sur les ailes et sur le plan arrière, cet avion uniquement solaire, sera le premier à pouvoir parcourir de grandes distances. Il traverse la Manche en 5 heures et 23 minutes, le 7 juillet 1981. Sur cet appareil, on voit déjà apparaître de très grandes surfaces voilures pour maximiser l'emport des cellules photovoltaïques. L'ensemble de ces projets montre l'importance des enjeux sur les masses en rapport de la grande faiblesse de l'énergie disponible. Ils sont construits à l'aide de matériaux composites et entoilés par des polymères extralégers (cf. fig. 3). Les composites comme le carbone/époxy⁷, possèdent une rigidité spécifique⁸ et une résistance spécifique⁹ pouvant être respectivement, 8 fois et 14 fois plus grandes que celles des matériaux métalliques.



Figure 3 : Le Sunrise II sur le lac asséché de la base Nellis dans le Nevada le 12 septembre 1975 et le Gossamer Penguin en 1980 (source AeroVironment Inc.)



Figure 4 : Le Solar Challenger en 1981 avant les essais en vol à Tucson (source Paul MacCready)

⁷ Fibres de carbone longues (60 %) noyées dans de la résine époxy (40%).

⁸ Rapport entre le module de rigidité du matériau et sa masse volumique, soit 217 MPa.m³/kg pour le carbone à haut module/époxy, 27 MPa.m³/kg pour l'acier et l'aluminium et 24 MPa.m³/kg pour le titane.

⁹ Rapport entre la résistance du matériau et sa masse volumique.

Les premiers travaux de recherche sur les drones solaires menés par la NASA datent de la fin des années 70. J. Parry en 74 comme James Youngblood *et al.* en 79 concluent qu'une plateforme haute altitude et longue endurance n'est pas faisable à ces dates^{10,11}. Les limitations proviennent de la masse des matériaux constituant la structure. Ce dernier auteur poursuit ses recherches et propose rapidement l'utilisation d'une pile à hydrogène régénérative pour le stockage de l'énergie de manière à effectuer le vol de nuit¹². Le principe de cette pile est d'utiliser une partie de l'énergie solaire disponible le jour pour faire fonctionner un électrolyseur (fig. 5). Celui-ci transforme de l'eau (H₂O) en hydrogène (H₂) et en oxygène (O₂). L'énergie est alors stockée dans des réservoirs sous forme liquide. La nuit, l'hydrogène et l'oxygène sont recombinaés dans la pile à combustible sous forme d'eau en libérant l'énergie électrique nécessaire au vol. L'énergie spécifique¹³ peut atteindre 450 Wh/kg, ce qui est bien supérieur à celle des batteries Li-Po (220 Wh/kg) et Li-Ion (130 Wh/kg).

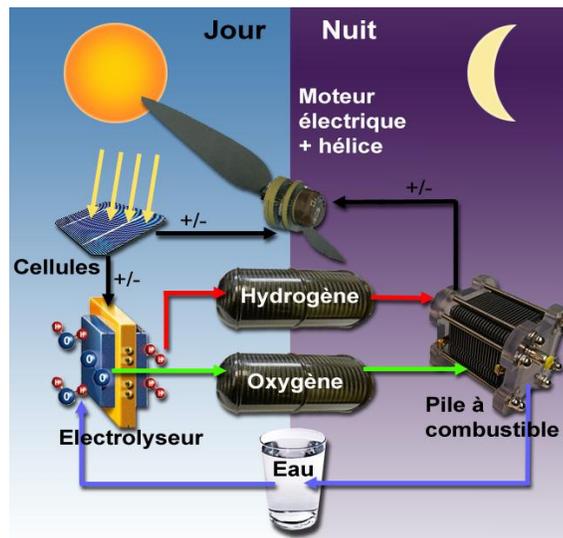


Figure 5 : Fonctionnement d'une pile à hydrogène régénérative à bord d'un aéronef.

Le premier programme important dans le domaine du drone solaire est le

¹⁰ J. F. W. Parry, « A Solar Powered Observation Platform », Defense Advanced Research Projects Agency RDA-TR 4300-088, 1974.

¹¹ J.W. Youngblood, W.L. Darnell, R.W. Johnson & R.C. Harriss, « Airborne Spacecraft-A Remotely Powered, High-Altitude RPV for Environmental Applications », Electronics and Aerospace Systems Conference, Arlington, Virginia, 1979.

¹² James W. Youngblood, Theodore A. Talay & Robert J. Pegg, « Design of long-endurance unmanned airplanes incorporating solar and fuel cell propulsion », 20th AIAA, SAE, and ASME, Joint Propulsion Conference, Cincinnati, Ohio, 1984.

¹³ Rapport entre l'énergie délivrée par la pile et sa masse.

programme ERAST¹⁴ de la NASA. Les objectifs sont la construction et l'évaluation de plusieurs types de drone grâce à une action conjointe entre les industriels, la recherche académique et les agences gouvernementales. Entre autres, la NASA avait pour objectif la construction d'un drone solaire capable de voler sans interruption durant six mois au-delà de 18 km d'altitude. Le but était à la fois de démontrer la faisabilité de tels engins et leur potentiel d'utilisation dans des missions scientifiques. Le drone solaire nommé Pathfinder fait ses premiers vols dès 1994 (fig. 6). Il avait en fait été réalisé en 1983¹⁵ par AeroVironment lors d'un projet classé secret défense¹⁶. Il portait alors le nom de HALSOL pour High-Altitude SOLar.

La configuration choisit pour le drone solaire est l'aile volante. Il n'y a quasiment pas de fuselage, seuls les deux trains d'atterrissage sont carénés. Cette configuration à l'avantage de supprimer la masse de l'empennage arrière et du tronçon entre la voilure principale et celui-ci. Le second intérêt est de pouvoir répartir la masse le long de la voilure ce qui aura tendance à limiter sa flexion. En revanche, l'aile volante pose des problèmes de stabilité et aussi de contrôlabilité puisque les gouvernes de roulis et de profondeur sont confondues. Malgré la répartition de masse favorable et la valeur très faible de celle-ci (252 kg), la très grande envergure (29,5 m) impose une importante déformation de la voilure (cf. fig. 4). Ce drone ne vole plus comme un avion rigide mais comme un avion souple.



Figure 6 : Pathfinder (source NASA).

Le 11 septembre 1995, Pathfinder atteint l'altitude record de 15,4 km au-dessus de la Californie. A partir de 1997, les essais sont réalisés à Hawaii notamment pour les conditions favorables d'ensoleillement et de prévisibilité météorologique. Il obtient alors le record d'altitude pour un avion propulsé par des hélices (21,8 km). Le rendement des cellules n'est alors que de 14 % et les petites batteries ne permettent pas le vol de nuit.

¹⁴ Environmental Research Aircraft and Sensor Technology (1994-2003)

¹⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_unmanned_aerial_vehicles

¹⁶ traduit de l'anglais de "NASA Dryden Fact Sheet - Pathfinder Solar-Powered Aircraft" sur www.nasa.gov

En 1998, Pathfinder devient Pathfinder Plus. La partie centrale de la voilure du drone a été allongée et deux moteurs ont été ajoutés. La puissance potentielle disponible passe de 7 500 W à 12 500 W. Il établit un nouveau record à 24,4 km le 6 août 1998, le vol dura 14,8 h. En 2001, Pathfinder Plus fut employé à démontrer sa capacité à effectuer une mission de surveillance. Plus précisément, le drone réalise avec succès des missions de contrôle de l'irrigation de la plus grande plantation de café des Etats-Unis sur l'île de Kauai¹⁷. Sa charge utile est alors de 45 kg.

Centurion apparaît en 1998, en parallèle du développement de Pathfinder Plus. Beaucoup plus grand, il préfigure le drone qui sera équipé d'une pile permettant le vol de nuit. Cette dernière évolution sera dénommée Helios et fera ses premiers vols en 1999 (fig. 7). Il possède une envergure de 75 m, supérieure à celle d'un Boeing 747 (compris entre 59,6 et 68,5 m selon les modèles) pour un poids total inférieur à 930 kg. Sa charge utile est de l'ordre de 100 kg. L'allongement¹⁸ de la voilure devient exceptionnellement grand ce qui est connu chez les aérodynamiciens pour diminuer la traînée. En revanche, la voilure est encore plus sujette à la déformation en flexion et la pilotabilité est amoindrie. Les matériaux composites constituent la majorité de la structure du drone (longerons, nervures, etc.) mais aussi celle des moteurs. Plus de 62 000 cellules photovoltaïques recouvrent la majeure partie de la voilure. Le contrôle du drone est aussi révolutionnaire. Le pilotage en lacet est obtenu par une répartition inégale de puissance sur les 14 moteurs électriques. Le pilotage en roulis et tangage est obtenu par le mouvement de 72 éleveurs positionnés sur le bord de fuite de la voilure.



Figure 7 : Helios lors de son premier vol avec la pile à hydrogène (cf. détail) le 7 juin 2003 (source NASA).

Helios atteint 29,5 km d'altitude le 13 août 2001 et obtient un record d'altitude non officiel toujours d'actualité. A cette altitude, la masse volumique de l'air a été

¹⁷ Stanley R. Herwitz, Lee F. Johnson & John C. Arvesen, « Precision Agriculture As A Commercial Application For Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles », 1st AIAA UAV Conference, Portsmouth, 2002.

¹⁸ Pour une aile droite, l'allongement correspond au rapport entre l'envergure et la corde de la voilure.

divisée par 30. Au niveau de la mer, Helios vole à la vitesse d'un vélo de course (40 km/h). Aux altitudes de croisière (entre 20 et 30 km), du fait de la forte diminution de la densité de l'air, la vitesse est beaucoup plus élevée et comprise entre 100 et 270 km/h.

En 2003, la NASA installe une pile à hydrogène dans la nacelle centrale du drone pour atteindre son objectif de vol longue endurance (cf. fig. 7). Lors de son second vol dans cette configuration, le 26 juin 2003, Helios rentre dans un mode d'oscillation instable qui lui sera fatal (fig. 8). D'après la commission d'enquête¹⁹, suite aux turbulences, le drone a atteint une configuration extrêmement fléchiée et imprévue qui a causé une oscillation en tangage couplée avec le mode structural fortement divergente. Le drone entraîné dans un piquet a ensuite dépassé de manière significative la vitesse de conception ayant pour résultat la rupture de la structure secondaire, et ainsi la perte de portance. Cet échec met fin au programme ERAST. L'ensemble du programme aura coûté 97 millions de dollars, la majorité étant attribuée au développement des drones solaires.



Figure 8 : Photos de l'accident de Helios le 26 juin 2003 prise par l'hélicoptère suiveur (source NASA).

A la même période, plusieurs projets de moins grande ampleur ont vu le jour en Europe. En Italie, le professeur Giulio Romeo de l'université Politecnico di Torino a mené le développement de deux drones HALE solaires : le Heliplat puis le Shampo. Le premier a été développé grâce au projet Européen HeliNet²⁰. Son envergure et sa masse sont de l'ordre de celle d'Helios. Le projet est allé jusqu'à l'élaboration et l'essai de la structure à l'échelle un. Le second est une variante du premier et a été

¹⁹ Thomas E. Noll, John M. Brown, Marla E. Perez-Davis, Stephen D. Ishmael, Geary C. Tiffany & Matthew Gaier, « Investigation of the Helios Prototype Aircraft Mishap - Volume I - Mishap Report », NASA, 2004.

²⁰ NETwork of Stratospheric Platforms for Traffic Monitoring, Environmental Surveillance and Broadband Services. Ce projet européen a été réalisé de 2002 à 2003 pour un budget de 4,8 millions d'euros.

uniquement développé sous forme numérique durant le projet Européen Capecon²¹. Faute de financements supplémentaires, les prototypes n'ont pas été réalisés.



Figure 9 : De gauche à droite et de haut en bas : le projet Vulture de Aurora Flight Sciences, de Boeing et Lockheed Martin (source Aurora Flight Sciences, Boeing et Lockheed Martin).

En 2005, la NASA a proposé l'étude d'un nouveau prototype appelé 100-day Demonstrator classé sans suite. En 2008, l'appel à projet Vulture de la DARPA²² transfère le développement des prototypes de HALE solaire vers les industriels. L'appel à projet souhaite voir la réalisation d'un démonstrateur capable de voler pas moins de cinq ans sans interruption. Trois avionneurs ont répondu. Boeing et Lockheed Martin ont proposé des solutions plus « classiques » mais ultra fiables tandis qu'Aurora Flight Sciences a proposé un drone en trois modules interchangeable (fig. 9). Ces modules décolleraient séparément et si besoin, un module pourrait revenir sur terre à tout moment. En 2010, le projet de Boeing nommé SolarEagle a remporté la première phase du projet Vulture c'est-à-dire la somme de 89 millions de dollars pour le développement du prototype. Ce projet est mené en collaboration avec Qinetiq, société britannique multinationale dans le domaine de la défense, et Versa Power Systems, leader dans les piles à combustible. Le programme prévoit un premier vol

²¹ Civil uav application and economic effectiveness of potential configuration solutions. Ce projet a fait intervenir une douzaine d'industriels, de laboratoires et d'universités de 2002 à 2005 pour un budget de 5,1 millions d'euros.

²² Defense Advanced Research Projects Agency.

en 2014.

Parallèlement, en Europe, Qinetiq réalise en 2008 le premier vol de son drone solaire Zephyr. Ce drone est beaucoup plus petit qu'Helios mais possède tout de même une envergure de 22,5 m (fig. 10). Son poids est de 53 kg et sa charge utile pèse seulement 2,5 kg. Compte tenu de sa taille, les batteries pour les vols de nuit sont des Li-S plus conventionnelles qu'une pile à combustible. Ce drone est le premier drone solaire à avoir effectué un vol de très longue durée. Il établit du 9 au 23 juillet 2010 un vol record de 14 jours et 22 minutes en Arizona (33° de latitude nord). En 2009, les Etats-Unis ont signifié leur désir de déployer un prototype de ce drone en Irak et en Afghanistan²³. Il semblerait que cette idée ait été classée sans suite.



Figure 10 : Lancement manuel du drone Zephyr en 2008 (source Qinetiq).

Tableau 1 : Caractéristiques des drones solaires réalisés depuis 1974 classés par tailles

	Pays	Développement	Poids CU max		Envergure	Plafond	Endurance	Vit. croisière
			kg	kg				
Helios	E-U	Prototype	727	100	75,0	29,5	17	34
Heliplat	Ita	Maquette éch. 1	620	130	73,0	18,0	4320	71
SHAMPO	Ita	Projet	620	100	73,0	17,0	4320	90
Centurion	E-U	Prototype	529	45	63,0	30,5	15	34
Pathfinder +	E-U	Prototype	247	68	37,0	24,4	14,8	32
Pathfinder	E-U	Prototype	207	45	30,0	21,8	14,5	32
Zephyr	En	Prototype	30	2	18,0	20,0	2160	23

Enfin il est difficile de ne pas évoquer l'avion Solar Impulse. Ce projet a été lancé par Franck Picard en 2003 en collaboration avec André Borschberg et l'EPFL²⁴. Le défi est de parcourir le tour du monde par étape à bord d'un avion solaire. Les dimensions de Solar Impulse sont proches de celles de Helios avec une envergure 63,4 m mais possède une masse deux fois plus grande de l'ordre de 1600 kg, liée

²³ « USA wants UK Zephyr in Afghanistan and Iraq », Flight Global, 21 May 2009.

²⁴ Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

notamment à la présence du pilote. La différence majeure entre les drones solaires et l'avion Solar Impulse est l'altitude de croisière puisque ce dernier ne dépasse pas les 8,5 km d'altitude. A ce jour, l'avion a effectué un vol record de 26 heures et 9 minutes de vol autour de Payerne en Suisse (46° de latitude nord).

Les caractéristiques des différents drones sont récapitulées dans le tableau 1.

Le difficile problème de la conception

Les deux principales difficultés de conception sont la faible énergie disponible et le vol aux hautes altitudes. L'énergie solaire reçue par les cellules photovoltaïques dépend de cinq facteurs : le jour de l'année, l'heure du jour, la latitude, l'altitude et l'inclinaison des cellules par rapport à l'horizontale. Par exemple, la figure 11 montre l'évolution de l'énergie solaire reçue par unité de surface, à l'horizontale, au niveau de la ville de Paris les jours extrêmes de l'année à différentes altitudes en fonction de l'horaire du jour. Au maximum, cette puissance atteint 839 W/m² au niveau du sol le jour du solstice d'été à midi et 1181 W/m² dans ces mêmes conditions à 20 km d'altitude, cette augmentation étant due à l'effet d'atténuation de l'atmosphère. Au solstice d'hiver, cette puissance n'est plus que de 198 W/m² au niveau du sol et de 424 W/m² à 20 km d'altitude. D'autre part, l'aire sous les différentes courbes donne l'énergie qui peut être reçue par unité de surface dans une journée. A 20 km d'altitude, cette aire et par conséquent l'énergie est divisée par cinq entre le solstice d'été et celui d'hiver. Il sera donc cinq fois plus difficile de voler au solstice d'hiver à nos latitudes. Toutefois en hiver, le soleil étant très bas, des cellules solaires restant orthogonales au rayonnement ou placées à la verticale capteront beaucoup plus d'énergie. Cette idée est utilisée dans les projets les plus récents en plaçant des cellules sur l'empennage arrière ou sur le fuselage ou même sur des panneaux orientables (cf. les trois projets de la fig. 9).

Imaginons maintenant que l'on désire faire voler un drone conventionnel avec la seule énergie solaire. Prenons l'exemple d'un drone d'observation HALE tel que le « Global Hawk » possédant une masse totale de l'ordre de 10 tonnes et évoluant à 640 km/h à 20 km d'altitude. Maintenir ce drone en vol à son altitude de croisière demande une puissance propulsive d'environ 610 kW. Pour obtenir cette puissance le jour du solstice d'été à midi et à nos latitudes, il faudrait, en supposant que 20%²⁵ de l'énergie électrique recueillie soit convertie en puissance motrice, plus de 2600 m² de cellules solaires soit l'équivalent d'un demi stade de football. Au solstice d'hiver et à midi, cette surface atteindrait près de 7200 m² c'est-à-dire bien supérieure à celle d'un stade de football. Cette surface serait encore très largement amplifiée si le drone devait continuer à voler la nuit car une grande partie de l'énergie devrait être stockée dans des batteries. En réalité la surface de la voilure du « Global Hawk » n'est que d'environ 50 m². Cet exemple montre qu'il est a priori très difficile de concevoir un

²⁵ Ce chiffre correspond au rendement des cellules photovoltaïques.

drone entièrement propulsé par la seule énergie solaire.

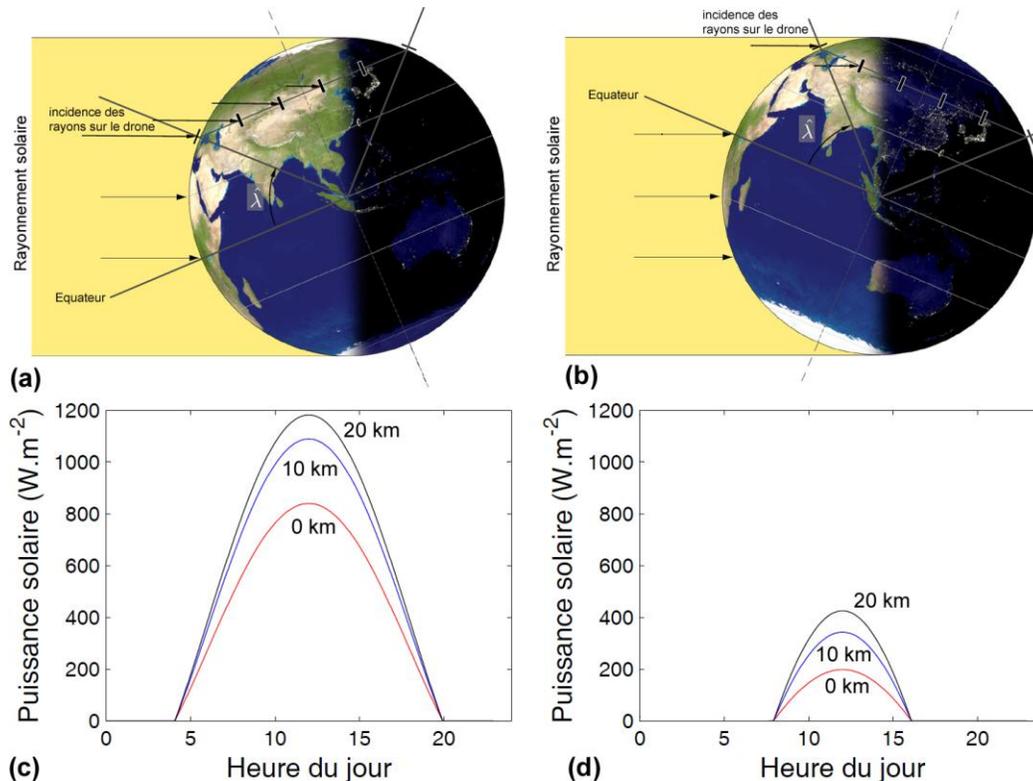


Figure 11 : Ensoleillement du drone (a) au solstice d'été et (b) au solstice d'hiver et puissance solaire surfacique disponible à l'horizontale en fonction de l'altitude, à 48° de latitude (Paris), (c) au solstice d'été et (d) au solstice d'hiver (CReA).

Les drones solaires devront être pensés différemment²⁶ car ce choix énergétique conditionne complètement les caractéristiques de ces futurs drones. Dans l'exemple du « Global Hawk », il est clair que la puissance nécessaire pour pouvoir maintenir le drone en palier est trop grande par rapport à la puissance solaire disponible. La puissance propulsive étant proportionnelle à la vitesse et à la masse, le seul moyen de faire voler un drone à l'énergie solaire est de minimiser sa vitesse et sa masse. Malheureusement les hautes altitudes visées demandent des vitesses élevées comme le montre l'équation de sustentation. L'équation de sustentation dit simplement qu'un aéronef est capable de se sustenter si sa portance équilibre son poids. La portance est proportionnelle à la masse volumique de l'air, à la surface de la voilure, au carré de la vitesse et à un coefficient de l'ordre de l'unité nommé coefficient de portance. A ces altitudes la masse volumique de l'air est dix fois plus petite qu'au niveau du sol. Pour compenser ce déficit d'air à masse fixée et à surface voilure fixée, la vitesse du drone devra être environ trois fois plus grande à 20 km d'altitude qu'au

²⁶ Les anglophones diraient "think out of the box".

niveau du sol (trois au carré étant proche du rapport dix). La solution sera donc d'augmenter la surface de la voilure, de diminuer la masse du drone et de voler au coefficient de portance maximal. L'augmentation de la surface voilure permet d'augmenter la surface des cellules en revanche elle aura tendance à augmenter la masse du drone. La diminution de la masse du drone ne pourra pas aller en dessous d'une certaine limite car le poids des batteries pour le vol de nuit est très élevé et le poids de la charge utile nécessaire aux missions de surveillance ou de télécommunication pèsera certainement plusieurs dizaines de kilos. Ces quelques éléments mettent en exergue la difficulté liée à la conception de ces drones. La solution optimale naîtra forcément d'un savant mélange de l'ensemble de ces paramètres. A l'heure actuelle, le récent appel à projet de la DARPA, où trois solutions totalement différentes étaient en concurrence (fig. 11), montre que la solution optimale pour le drone n'est pas encore trouvée.

Un exemple de conception

La conception d'un nouvel aéronef est généralement basée sur des approches statistiques²⁷. Les avionneurs possèdent suffisamment de données et d'expérience pour créer un nouvel aéronef par simple effet d'échelle avec peu d'innovation et peu de risques. Ceci est possible car la morphologie des avions conventionnels est établie depuis les années 60. Dans le cas des drones solaires, cette morphologie type n'étant pas encore établie, la conception nécessite de revenir à des approches physiques.

Depuis 2006, l'équipe de Dynamique du Vol du CReA s'intéresse à la problématique du drone HALE solaire et développe des modèles²⁸ pour démontrer la faisabilité ou non de tels engins. Dans ce cas, le nombre de paramètres de conception étant très grand, il est beaucoup plus efficace de rechercher une solution optimale à l'aide d'outils informatiques dit d'optimisation multidisciplinaires. L'objectif fixé par l'équipe est de concevoir, du point de vue théorique uniquement, un drone capable de voler en permanence au-dessus de la ville Paris.

Pour trouver cette solution, plusieurs types de géométries d'appareils peuvent être envisagés : mono-fuselage, fuselage bi-poutres ou plus, aile volante, avec ou sans panneaux solaires orientables, etc. A l'heure actuelle, ce travail s'est limité au cas de l'aile volante (fig. 12).

La première part de l'activité de recherche a consisté à développer des modèles physiques génériques, c'est-à-dire applicables à une large gamme de drones, permettant de calculer la masse de l'aéronef pour un point de vol donné (fig. 13). La structure est par exemple basée sur un longeron principal composite tubulaire. Les modèles physiques sont a priori plus fiables que les modèles statistiques même si

²⁷ Egbert Torenbeek, « Synthesis of subsonic airplane design », Springer, 1982.

²⁸ Olivier Montagnier & Laurent Bovet, « Optimisation of a solar-powered HALE UAV with composite wings », 3rd European Conference for Aerospace Sciences, Paris, France, 2009.

cette philosophie n'est pas suivie dans tous les travaux sur les drones solaires²⁹. Contrairement à ce qui est fait généralement en mécanique moderne, les modèles ne sont pas numériques (méthode des éléments finis) mais analytiques pour diminuer les temps de calculs. En effet, l'algorithme d'optimisation doit être capable de tester plusieurs millions de solutions dans un temps raisonnable ce qui nécessite des temps d'évaluation très courts pour un jeu de paramètres.



Figure 12 : Concept de HALE solaire développé au CReA

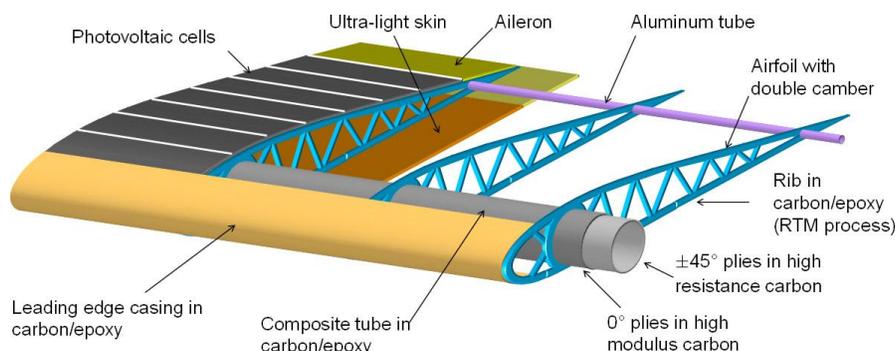


Figure 13 : Détails de la voilure utilisée pour la conception du drone solaire (CReA)

Une seconde part du travail concerne l'optimisation de la trajectoire du drone en altitude. L'idée ici est de stocker une part de l'énergie solaire sous la forme d'énergie potentielle simplement en montant le jour et en descendant la nuit. Plusieurs types de trajectoires ont été étudiés. Les derniers travaux ont montré que l'énergie emmagasinée dans les batteries pouvait être réduite de 5% en réalisant une montée de 4 km d'altitude juste avant la nuit, et une descente équivalente au début de la nuit, d'où un gain potentiel de masse³⁰.

²⁹ Dans le cas du développement du micro-drone solaire Sky-Sailor de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, la conception a été basée sur un mélange de modèles physiques et de modèles statistiques. North, A., Siegart, R. and Engel, W. (2007). "Autonomous Solar UAV for Sustainable Flights", in *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, Springer, pp 377—405.

³⁰ Olivier Montagnier & Laurent Bovet, « Optimisation of a solar-powered high altitude long

La troisième partie du travail concerne l'optimisation proprement dite. Cette optimisation a été réalisée à masse et à allongement fixés, respectivement 817 kg et 31,25 correspondant aux caractéristiques du drone Helios (fig. 8) et à 22° de latitude correspondant à la latitude d'Hawaii. L'algorithme d'optimisation cherche le drone permettant de voler en continu et possédant la plus grande charge utile. Le calcul détermine sa géométrie, les masses de ses différents éléments dont celles de la structure, de la pile, de la charge utile, sa vitesse de croisière, son coefficient de portance en croisière, etc. Pour ce jeu de paramètres, le 22 juin, les calculs montrent qu'il existe un drone possédant une charge utile de 36 kg capable de voler en continu. La solution obtenue est très proche du drone Helios. Cependant, les résultats montrent aussi que ce drone ne pourra pas voler en hiver à ces latitudes tropicales. Le « crash » du drone Helios (fig. 8) ne permettra pas de vérifier ces résultats. L'optimisation sur tous les paramètres devrait être effectuée prochainement.

Ces travaux montrent que la faisabilité d'un tel drone est difficile avec les technologies actuelles. Cependant les progrès réguliers dans le rendement des cellules photovoltaïques permettent d'être résolument optimiste. Les calculs ont été menés avec un rendement de 18% pour les cellules. Ce rendement pourrait être doublé dans le futur³¹. D'autre part, des solutions avec des panneaux solaires orientables permettront de capter énormément plus d'énergie l'hiver même si ces solutions poseront d'autres problèmes comme des problèmes de stabilité et de sensibilité aux vents de travers (fig. 11).

Conclusion

Il est raisonnable de penser que le vol « perpétuel » grâce à l'énergie solaire sera possible dans un futur proche. Les récents progrès dans les technologies photovoltaïques, dans les batteries, dans les matériaux composites et dans la miniaturisation des charges utiles électroniques permettent déjà de trouver des drones volant plus de 24h à des latitudes tropicales et durant l'été. Cependant, le vecteur permettant de réaliser l'exploit du vol continu y compris l'hiver à ces latitudes n'existe pas encore. A nos latitudes, il faudra certainement attendre plus longtemps. L'existence d'une solution sera notamment conditionnée par l'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques. Enfin, on notera l'avance prise par les Etats-Unis dans la réalisation de prototypes grâce à un investissement conséquent de 190 millions de dollars depuis le début des années 90. L'Europe, en investissant environ 10 millions d'euros de 2002 à 2005, est quant à elle plus spectatrice qu'actrice du point de vue des prototypes même si des travaux de recherche existent sur ce sujet.

endurance uav », 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Nice, France, 2010.

³¹ Des chercheurs américains du NREL ont atteint un rendement de 40,8% sur des cellules appliquées au solaire à concentration.