



Aéronautique & Astronautique
Les Conférences
du Groupe
3AF Île-de-France
2016-2017

Comptes-rendus – n°3

3AF – Groupe Île-de-France

Association Aéronautique et Astronautique de France

6 rue Galilée – 75016 Paris

Tél 01 56 64 12 30 - Fax 01 56 64 12 31

email : gestionmembres@aaaf.asso.fr

www.3af.fr

Association Aéronautique et Astronautique de France

6 rue Galilée 75016 Paris

Tél 01 56 64 12 30 - Fax 01 56 64 12 31

email : gestionmembres@aaaf.asso.fr

3AF – GROUPE ÎLE-DE-FRANCE

email : 3af.idf@gmail.com

Site Web : <http://www.3af.fr/groupe-regional/idf>

Tél : 01 80 38 62 01 - Fax : 01 80 38 62 69

Président : Paul KUENTZMANN

Vice-Président & Comité Jeunes : Gérard LARUELLE

Vice-Président & Communication : Patrick GILLIÉRON

Trésorier– Gestion des membres : Fanny BOUCHER

Conférences : Nicolas BÉREND, Patrick GILLIÉRON & Gérard LARUELLE

Ont participé à l'élaboration de ce document :

Paul KUENTZMANN & Patrick GILLIÉRON - rédaction des comptes-rendus

Patrick GILLIÉRON et Clémentine CHEVALIER - éditeurs

Relectures - Francis HIRSINGER & Sophie PLAZANET

Éditorial

Voici le troisième recueil des résumés de conférences du Groupe 3AF Ile-de-France pour la période 2016-2017. Né d'une initiative en 2012, il se donne pour principal objectif de laisser une trace des conférences organisées et d'alimenter la documentation des passionnés de l'Aéronautique et de l'Astronautique. Compte tenu de certaines contraintes pratiques, dont en particulier le volume des recueils imprimés, il s'agit plus de résumés essayant de capter les informations les plus pertinentes que de comptes-rendus exhaustifs, rien ne remplace la participation effective aux conférences. Après plus de six ans d'existence des recueils des conférences du Groupe Ile-de-France, une procédure a été mise en place et est maintenant rôdée. Il n'est peut-être pas inutile d'en rappeler le déroulement.



Les conférences sont celles décidées par le bureau 3AF Ile-de-France et celles organisées par la commission technique Propulsion en association avec le Groupe IDF. Cette commission technique est en effet la seule à donner des conférences en Ile-de-France.

Les conférences Ile-de-France sont programmées sur une année à partir du second semestre de l'année précédente par le bureau IdF qui se réunit tous les mois. Le choix des thèmes résulte d'un équilibre assez délicat, il faut en effet équilibrer entre Aéronautique et Astronautique, essayer de coller à l'actualité pour intéresser un assez large public, composer avec la disponibilité des salles (Mairie du 15ème pour les conférences décidées par le groupe IdF; les conférences de la commission technique Propulsion se tiennent à la salle de l'Espace du CNES), trouver des orateurs volontaires pour les thèmes sélectionnés. Les orateurs venant de Province sont remboursés de leurs frais de déplacement et d'hébergement.

Les flyers d'annonce sont préparés à l'avance et largement diffusés sur internet. Il est demandé à ceux qui veulent assister à la conférence de s'inscrire de façon à ce qu'il y ait une bonne adéquation entre le nombre d'inscrits et la contenance de la salle. Il a été observé qu'en règle générale il y a plus d'inscrits que de participants à la conférence.

Le résumé est préparé par un membre du bureau, le plus souvent par le président dans la période actuelle. Il est transmis à l'orateur ou les orateurs pour correction et validation. Une fois validé, il alimente, en dehors du recueil des conférences, la Gazette IdF. Il peut être déposé, si l'orateur l'autorise, ainsi que le fichier des planches présentées, sur le site IdF de 3AF.

La diffusion du recueil est faite électroniquement aux présidents des commissions techniques et des groupes régionaux. Un certain nombre d'exemplaires papier sont imprimés et distribués lors des manifestations 3AF en vue d'attirer des adhérents.

Cette procédure peut sembler assez lourde et donne effectivement un travail certain mais n'a pas rencontré pour l'instant d'obstacles insurmontables.

Paul Kuentzmann, président du groupe 3AF Ile-de-France

Sommaire

<i>Jean-Claude Bourdeaud'hui & Benoît Gilles - Le vol des insectes</i>	<i>06</i>
<i>Jean-Marc Garot - Comment des avions disparaissent.....</i>	<i>09</i>
<i>Thierry Prunier - Présent et futur des drones civils.....</i>	<i>12</i>
<i>Simon Desindes et Laurent Hodinot - M88, la propulsion du Rafale.....</i>	<i>15</i>
<i>Christophe Bonnal - Débris spatiaux, comment s'en débarrasser ?</i>	<i>18</i>
<i>Pascal Bultel - Lanceurs Spatiaux Réutilisables.....</i>	<i>22</i>
<i>Adriana Domergue - L'Association Française des Femmes Pilotes.....</i>	<i>27</i>
<i>Alain Charneau - Ariane 6.....</i>	<i>29</i>
<i>François Charritat - Les aéroports franciliens : le temps de la maturité.....</i>	<i>32</i>
<i>Thierry Prunier - nEUROn, démonstrateur Européen des technologies pour drones de combat.....</i>	<i>35</i>
<i>Anne Thenaisie et Frédéric Laithier - Fabrication Directe Propulsion.....</i>	<i>38</i>
<i>Lucie Poulet & Cyprien Verseux - Simulation terrestre de séjours martiens.....</i>	<i>41</i>
<i>Vincent Garnier - Safran Tech, le groupe de recherche du groupe Safran.....</i>	<i>44</i>
<i>Jean-Pierre Grisval - Aéroélasticité et vibration des aéronefs.....</i>	<i>46</i>
<i>Pierre Duval - L'avenir de la propulsion électrique,</i>	<i>49</i>

Le vol des insectes Jean-Claude Bourdeaud'hui & Benoît Gilles

Judi 10 Décembre 2015 de 18h30 à 19h30

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris



Les premiers fossiles d'insectes volants remontent au carbonifère, il y a 324 millions d'années, ce qui laisse supposer l'origine des insectes au cambrien, il y a 500 millions d'années, les papillons au triassique, il y a 250 millions d'années.

Les ailes des insectes volants (ptérygotes), qui représentent environ 90 % des espèces d'insectes, sont apparues à la suite d'évolutions favorisant la dispersion des populations, la capacité à fuir les prédateurs et une meilleure stratégie de reproduction. Diverses théories existent, en particulier celle de l'entomologiste tchèque Jarmila Kukalora qui s'appuie sur une description des appendices des arthropodes biramés et explique la présence sur les ailes de muscles, de nervures et de structures mécanosensorielles. L'anatomie détaillée d'une aile est extrêmement complexe : le thorax participe au vol, la structure propre des ailes est composée de multiples éléments et chaque espèce d'insectes possède des caractéristiques spécifiques d'aile (figure 2). Les diptères ont deux ailes antérieures et deux balanciers ou haltères postérieurs, les coléoptères ont une paire d'ailes rigides (élytres) et une paire d'ailes souples pliables, les coléoptères possèdent des ailes antérieures avec nappe stridulatoire.

Cette présentation originale a été divisée en deux parties complémentaires : Benoît Gilles (<http://passion-entomologie.fr>) a d'abord livré une description détaillée des insectes ailés, puis Jean-Claude Bourdeaud'hui a traité de leur aérodynamique.

Benoît Gilles a commencé par donner la définition d'un insecte et des structures anatomiques le caractérisant. Le dictionnaire définit l'insecte comme « un petit animal invertébré dont le corps est divisé par étranglements et par anneaux, possédant une tête munie d'antennes et de trois pièces buccales, un thorax à trois segments pourvus chacun d'une paire de pattes et qui parvient à l'âge adulte par une série de métamorphoses » (Petit Robert), ce qu'illustre la figure 1. La métamorphose peut être complète (homométabole) si l'œuf donne d'abord naissance à une larve, ou incomplète (hémimétabole).

Les insectes occupent une place particulière dans l'arbre du vivant et se distinguent des vers, des myriapodes¹ et des crabes et crustacés ; un million d'espèces ont été répertoriées et décrites mais leur nombre total est estimé entre 2,5 et 10 millions d'espèces ; un arbre phylogénétique² a pu être établi (Misof et al., 2014).

1. Myriapode : communément appelé **mille-pattes**, animal au corps allongé et segmenté.

2. Arbre phylogénétique : qui rend compte des degrés de parenté entre les espèces.

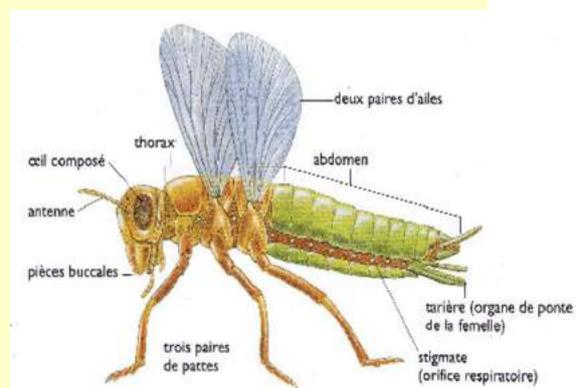


Fig. 1 - Anatomie d'un insecte volant.

Le vol des insectes

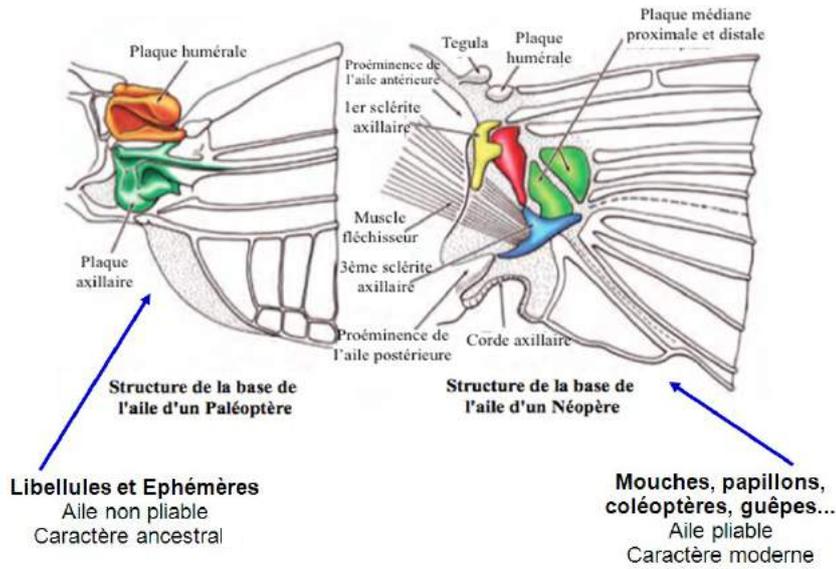


Fig. 2 - Des ailes complexes et différentes selon les espèces.

3. Effet clap and fling : littéralement frappé et écarté. Effet Clap, lié à l'interaction des deux ailes lorsque celles-ci se touchent à la fin de leurs remontées respectives. Il supprime l'effet Wagner lié au retard à l'établissement de la portance sur l'aile. Effet fling, effet d'écartement des deux ailes qui induit une augmentation transitoire importante de portance.

4. Effet clap and peel : autre version du clap and fling pour les papillons.

5. Effet Kramer : effet lié à l'émission d'un tourbillon supplémentaire de bord de fuite lors des phases de pronation (aile de l'avant vers l'arrière) et de supination (resp. de l'arrière vers l'avant).

6. Effet de masse ajoutée : effet de réaction lié au déplacement de la masse d'air vers le bas.

La dernière partie de la présentation de Benoît Gilles a porté sur la musculature et le contrôle du vol. La petite taille des insectes est associée à des battements d'aile à très haute fréquence (autour de 1000 Hz pour le moustique). Un problème se pose alors car cette fréquence se situe au-delà de la capacité naturelle des muscles. L'explication tient à l'existence, d'une part, de muscles dorso-longitudinaux et de muscles dorso-ventraux fonctionnant de manière asynchrone et, d'autre part, à un système de contrôle ne s'effectuant pas dans le cerveau mais dans des ganglions thoraciques. Des animations ont montré le mouvement des ailes de la libellule, du sphynx, de la chauve-souris et du colibri, prouvant, si besoin était, la complexité et la diversité du mouvement.

Jean-Claude Bourdeaud'hui a ensuite livré un discours que l'on peut schématiquement diviser en deux parties : l'histoire de l'étude du vol des insectes et l'évolution parallèle de l'aérodynamique, d'une part, et les progrès réalisés depuis quatre décennies, d'autre part. La plupart des grands savants : Léonard de Vinci, Bernoulli, Jean Rond d'Alembert, Euler, ..., se sont intéressés au vol des oiseaux et des insectes et ont tenté d'en expliquer les fondements théoriques en étudiant les forces agissant sur une aile, en introduisant la viscosité du fluide et en distinguant les régimes d'écoulement. Un pas important sera franchi par la définition du nombre de Reynolds, rapport entre force

d'inertie et force de frottement, qui permet d'identifier différents régimes d'écoulement. L'observation a aussi été développée par des précurseurs comme Etienne-Jules Marey (chronophotographie du vol des oiseaux) et Antoine Magnan (vol des insectes). À la fin du 19ème siècle, le vol des oiseaux et des insectes restait mystérieux. Les progrès réalisés à partir du début du 20ème siècle (Magnus, Kutta-Joukowski,...) ont permis de consolider la science aérodynamique naissante en introduisant des notions essentielles telles que couche limite, vorticités, tourbillon et circulation.

Les progrès enregistrés ces quarante der-

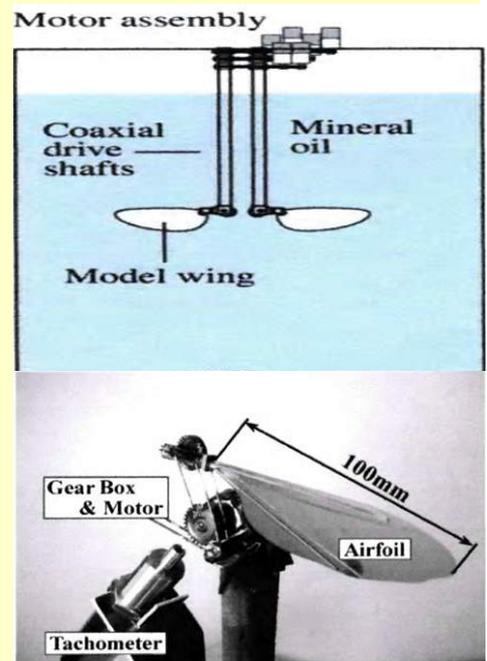


Fig. 3 - Simulation expérimentale du battement d'une paire d'ailes d'insecte.

nières années portent aussi bien sur l'observation que sur la compréhension théorique des écoulements autour des ailes d'insecte. Pour l'expérimentation, on peut soit visualiser par cinématographie rapide le mouvement des ailes d'un insecte attaché à un support, soit reproduire mécaniquement le mouvement d'ailes modèles (figure 3).

La compréhension théorique a donné lieu à diverses hypothèses plus ou moins partagées : effet « clap and fling³ », effet « clap and peel⁴ », effet Kramer⁵, effet de masse ajoutée⁶, effet de décrochage retardé. Ce qui paraît admis ce sont, d'une

Le vol des insectes

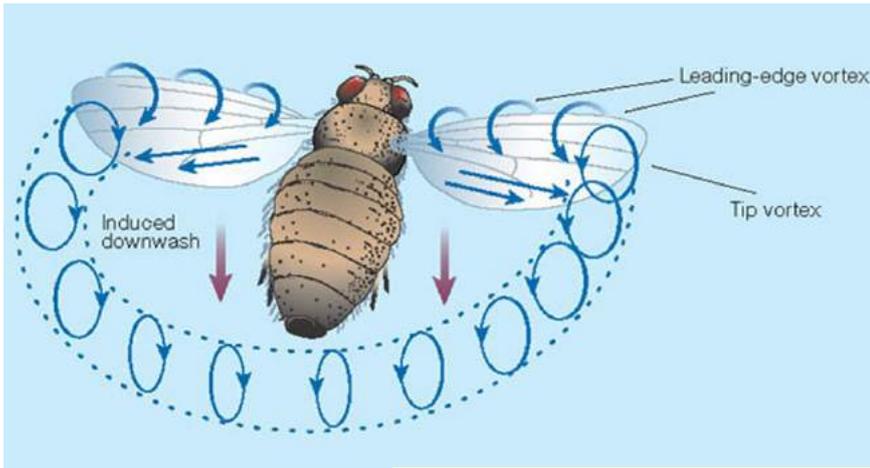


Fig. 4 - Anneau tourbillonnaire du sillage d'un gros insecte.

part, l'importance de la viscosité (faible nombre de Reynolds) et des instationnarités et, d'autre part, l'existence de nombreuses structures tourbillonnaires ; la question de décollements-recollements périodiques paraît par contre moins bien renseignée, ce qui peut s'expliquer par la complexité des écoulements à décrire. Les études de sillage ont mis en évidence la sensibilité à la taille de l'insecte : les insectes de « grande » taille forment un anneau tourbillonnaire (figure 4) tandis que les insectes de taille moyenne développent des tourbillons alternés.

De nombreuses questions ont été posées



au cours et à l'issue de la conférence, elles ont principalement porté sur la forme et la cambrure des ailes, ainsi que sur leur possible déformation en vol. Cette conférence originale a permis de prendre conscience de la complexité du vol des insectes, ce qui ne devrait pas surprendre puisque Dame Nature a pu dépenser des dizaines de millions d'années pour optimiser les conditions optimales de vol des insectes.

Références

- *Introduction mathématique à la mécanique des fluides*, Caius Jacob, Gauthier-Villars, 1959.
- *Mouvements de l'air*, Etienne Marey, photographe des fluides, Georges Didi-Huberman et Laurent Mannoni, Gallimard, Musées Nationaux, 2004.
- *Le miracle du vol*, Stephen Dalton, Edita Denoël, 1978.
- *Le vol des insectes*, Michael Dickinson, Pour la Science, août 2001.
- *Aérodynamique d'un profil d'aile battante à bas nombre de Reynolds*, Jean-Yves Andro, thèse ENS-MA, 2008.
- *The Evolution of Insect Flight*, Andrei K. Brodsky, Oxford Science Publications, 1996.
- *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*, Wei Shyy, Yongshen Lian, Jian Tang, Dragos Viteru and Haoliu, Cambridge Aerospace Series, 2008.
- *The Biomechanics of Insect Flight*, Robert Dudley, Princeton University Press, 2002.
- *Dissecting Insect Flight*, Z. Jane Wang, Theoretical and Applied Mechanics, Cornell University, 2005.
- *The Aerodynamics of Insect Flight*, Sanjay P. Sane, University of Washington, 2003.

Le temps a manqué pour évoquer les tentatives biomimétiques de création d'insectes artificiels volants comme le RoboBee de l'université d'Harvard.

PK

Mardi 26 Janvier 2016

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris



1. Jean-Marc Garot a été successivement responsable du projet CAUTRA 4 (*système d'assistance automatisé*) au Service Technique de la Navigation Aérienne puis conseiller auprès du directeur du projet "Advanced Automation System" de la FAA (*Federal Aviation Administration aux États-Unis*). Il a dirigé le Centre d'Études de la Navigation Aérienne de 1987 à 1995 puis a été directeur du centre expérimental d'Eurocontrol jusqu'en 2005. Il contribue aujourd'hui aux inspections d'organismes scientifiques et techniques au sein du conseil général de l'environnement et du développement durable.

2. Peu après la conférence, un livre dont Jean-Marc Garot est co-auteur est paru. Il s'agit de « Le détournement du MH370, pourquoi faut-il chercher l'épave....ailleurs », Michel Delarche et Jean-Marc Garot, librinova, 2016.

Figure 1 - La première partie du vol du MH370

L'orateur, qui a été un spécialiste du contrôle du trafic aérien, s'est attaché au cours de sa présentation à expliquer à un large public comment des avions peuvent encore disparaître, ce qui est a priori choquant à une période où tout individu détenteur d'un smartphone peut en principe être connecté et géolocalisé en permanence. Cela a été le cas du vol MH370 de Malaysia Airlines disparu depuis le 9 mars 2014 et dont l'épave n'a toujours pas été retrouvée. La présentation n'a pas tenté d'expliquer le pourquoi² de cette disparition mais plutôt de mettre en évidence les éventuelles insuffisances du système mondial de contrôle du trafic aérien. Jean-Marc Garot s'est exprimé en son nom propre, après avoir participé à un groupe de travail de l'Académie de l'Air et de l'Espace sur le sujet.

Le terme même de disparition demande une explication. Il existe des disparitions temporaires et compréhensibles et des disparitions définitives. Pour ces dernières, les statistiques du BEA (Bureau d'Enquêtes et d'Analyses) établissent que depuis 1969, 56 avions de transport public ont disparu en mer ou dans des eaux intérieures et que dans 12 cas, l'épave n'a pas été retrouvée soit pour des raisons techniques, soit faute de financement.

Ce constat pose la question des dispositifs actuels de suivi, de localisation et de récupération des avions : sont-ils suffisamment développés pour qu'aucun avion n'échappe à leur contrôle ? La disparition du MH370 a mobilisé les énergies internationales, notamment l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) qui a tenu le 2 février 2015 le « Second ICAO High Level Safety Conference » puis diffusé le 9 mars 2015 le rapport « ICAO Factual Information Safety Investigation for MH370 ». Cet épais document officiel explique comment l'avion a disparu mais n'apporte pas d'information sur le pourquoi. Il existe de nombreux articles et documents sur cette dernière question mais qui n'engagent que leurs auteurs. Jean-Marc Garot s'est donc limité au cours de la conférence à observer qu'un avion peut disparaître malgré l'ATC (Air Traffic Control), les CCOs (Centres de Contrôle des Opérations des compagnies aériennes), les défenses aériennes et la visualisation du trafic sur internet.

La première partie du vol sur la route prévue a été tout à fait normale entre Kuala Lumpur et la fin du contrôle malaisien et le transfert de l'avion au contrôle vietnamien, lequel n'a toutefois réagi qu'après 19 minutes. Durant cette période de transfert, il y a eu coupure du transpon-



Comment les avions disparaissent



3. UTC, Temps Universel Contrôlé en français. Échelle de temps adoptée comme base de temps civil international par la majorité des pays du globe.

Figure 2 - La deuxième partie du vol MH370

deur de bord, ce qui a fait disparaître l'avion des radars secondaires du contrôle civil. Cette coupure a affecté l'ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System), une sorte de télex entre l'avion et la compagnie, figure 1.

Le CCO de Malysan Airlines n'a été informé d'un problème qu'après 40 minutes. Le système ADS-B (Automatic Dependence Surveillance-Broadcast) n'a pu transmettre la position de l'avion en raison de la coupure du transpondeur. Tous les systèmes liés à internet, comme Flight Radar 24, basés sur le partage des informations civiles ne pouvaient non plus suivre le MH370. Donc à la suite de la coupure du transpondeur de l'avion et du déroutement vers l'ouest, seuls des radars primaires de défense aérienne étaient en mesure de détecter l'avion. Les armées de l'air maintiennent en général un dispositif d'alerte ; il convient à ce propos de distinguer ce qui relève de la sécurité des vols (éviter les collisions, à la charge des contrôleurs) et ce qui a trait à la sûreté, en liaison avec des intentions malveillantes. Les moyens militaires sont mobilisés en cas de perte de contact radio, en cas de perte de contact transpondeur (cela a été le cas ici), en cas d'appel de détresse et pour la coordination des moyens de recherche et de sauvetage. De nombreux contacts semblent avoir été établis par les radars militaires malaisiens pendant environ une heure après le déroutement mais n'ont donné lieu à aucune réaction de l'armée de l'air malaisienne ou de celles des pays voisins (Indonésie et Thaïlande), figure 2.

Tout au long de son vol, le MH370 disposait de la liaison satellitaire Satcom/Immarsat Indian Ocean 1.3 et de la liaison avec la station GES (Ground Earth Station)

de Perth. A 17:07 UTC³, une liaison automatique a eu lieu avec Satcom pour envoyer un message ACARS standard indiquant que l'avion avait suffisamment de carburant pour voler jusqu'à 00:12 UTC. De 17:07 à 00:10 UTC il y a eu des transmissions Satcom informant que le lien était disponible mais non utilisé pour la voix, pour l'ACARS ou pour les autres services de données. Il y a eu en tout 6 « handshakes » ou « pings », c'est-à-dire des signaux brefs dont l'analyse par des spécialistes a permis de conclure que l'avion s'était dirigé plein sud dans la dernière partie de son vol, ce qui a orienté les explorations en mer menées ultérieurement. La dernière interrogation du GES de Perth a été sans réponse Satcom de l'avion.

La synthèse réalisée par Jean-Marc Garot a porté sur les points suivants.

La « perte » d'un avion peut s'expliquer en premier lieu par la fragmentation du contrôle aérien, qui empêche un suivi continu. Les systèmes actuels de communication et de surveillance présentent des insuffisances que ne pallient pas toujours les CCOs des compagnies aériennes. De même les défenses aériennes ne pallient pas toujours la perte de contact avec un avion.

La « High Level Safety Conference » de l'OACI de février 2015 a mis en évidence le besoin d'un « global tracking » mais a fait l'objet de critiques : un planning irréaliste, une fréquence de report de position trop faible, l'absence de réflexion sur les déconnexions volontaires, pas d'avancée sur la récupération des données après accident, aucune mise en évidence des défauts d'organisation et de coordination entre organismes civils et militaires. En



Comment les avions disparaissent



OUVRAGES PARUS

[1] **Michel Delarche et Jean-Marc Garot**, le détournement du MH370, Pourquoi faut-il chercher l'épave ailleurs ? 2017, ISBN 979.1.02620.641.5.

[2] **Florence de Changy**, Le vol MH370 n'a pas disparu, éditeur Les Arènes, 9 mars 2016, 250 pages, EAN13 : 978.2.35204.505.2.

[3] **Morbraz**, Le vol MH370 de la Malaysia Airways ne répond plus, éditions Picollec, 2017, 268 pages, ISBN 978.2.86477.281.1.

[4] **Ghyslain Watrelos**, Vol MH370 Une vie détournée, éditeur Flammarion, 280 pages, EAN13 978.2.08142.223.0.



fait les recommandations ont été uniquement dirigées vers les compagnies aériennes.

La disparition du MH370 a généré une multitude d'annonces pour l'utilisation accrue de constellations de satellites et de l'ADS-B (B pour Broadcast) et de l'ADS-C (C pour Contract), ainsi que de futures balises de détresse Cospas-Sarsat, en liaison avec Galileo. L'utilisation des systèmes IFEC (In-Flight Entertainment and Connectivity) a aussi été suggérée.

La principale conclusion de l'orateur est que les communications sol-bord ne progressent que lentement du fait que les compagnies aériennes n'ont qu'un faible intérêt opérationnel à suivre leurs avions et que l'innovation est peut-être à rechercher dans les communications passagers en développement, qui ont elles un réel intérêt commercial.

Les questions et commentaires ont été nombreux et ont porté sur les points suivants.

- Quelle est la réglementation pour la traversée des frontières et le passage de relais ?
- Pourquoi les défenses Aériennes locales n'ont-elles rien vu ?
- Les technologies ATC reposent actuellement sur la VHF. Les nouvelles technologies font peur, sont difficiles à certifier et ne sont pas plus fiables. La VHF reste robuste, la 3G est réservée aux systèmes critiques.
- La R & D n'a pas été réussie, en raison d'objectifs trop ambitieux (cas de NextGen) et les compagnies aériennes ne financent pas les recherches.
- Le problème est essentiellement économique et les compagnies aériennes ne sont pas incitées à investir.
- Ne pas oublier l'humain !

Jean-Marc Garot a donc réussi à mobiliser l'intérêt de l'auditoire sur un problème d'actualité difficile. Qu'il en soit vivement remercié.

PK

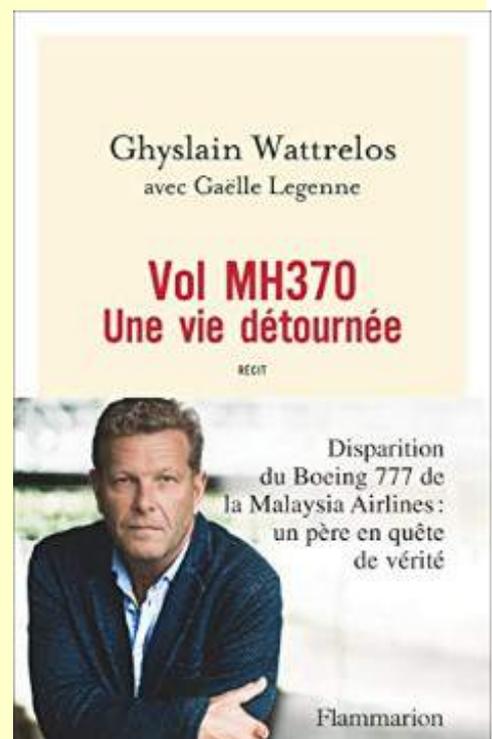




Fig. 1 - Types de drones civils.

1. UAV : Unmanned Aerial Vehicle

RÉFÉRENCES

« Présent et futur des drones civils », dossier commun de l'AAE (dossier n°40) et de la 3AF (cahier n°16), septembre 2015. WikiMot.fr

Thierry Prunier, ingénieur retraité de Dassault-Aviation et membre de l'Académie de l'Air et de l'Espace, a livré devant un large auditoire une conférence très vivante et agrémentée de nombreuses vidéos (non reproduites ici) sur les drones civils, aussi appelés UAV¹. Ce sujet fait de plus en plus fréquemment la une de l'actualité. Un drone est un aérodyne sans équipage télépiloté depuis le sol ou programmé.

Il existe une grande variété de drones, leur masse s'échelonnant du gramme (RoboBee) à une dizaine de tonnes (drone militaire RQ4 Global Hawk). Un million de drones civils volent déjà dans le monde et entre 150 000 et 200 000 drones de loisir, d'une masse inférieure à 2 kilogrammes, ont été vendus en France, ce qui donne une idée d'un marché que l'on peut qualifier d'émergent et justifie la création d'associations spécialisées, telles que la Fédération Française du Drone Civil, et le développement d'une nouvelle filière industrielle dynamique occupant en France environ 3 000 personnes en 2014, réparties essentiellement dans des PME et TPEs, soit pour la fabrication, soit pour l'exploitation (fourniture de données et de services).

La présentation a été focalisée sur les petits drones civils français à usage pro-

fessionnel. Les trois quarts d'entre eux utilisent une voilure tournante, pour leur sustentation/propulsion, avec une conception multirotors jusqu'à 4 kg et une conception à voilure fixe pour les plus gros (25 kg, figure 1).

Leur prix dépend des caractéristiques de la charge utile, une bonne approximation pour les plus gros est 6 kEuros/kg. Les drones de 2 kg et de 2 à 4 kg sont les plus nombreux, avec 42 et 44 % respectivement de la totalité (figure 2).



Fig. 2 - Répartition en fonction de la masse.

Le marché des drones civils couvre des domaines d'activité variés (figure 3), la tendance étant vers l'accroissement des services, dont les plus importants sont hors média :

- la surveillance des grands réseaux (voies ferrées, oléoducs et gazoducs, lignes électriques, etc) ;
- le diagnostic de l'état de bâtiments, constructions et ouvrages d'art ;
- la cartographie et le suivi de chantiers ;
- l'agriculture et l'environnement.



Fig. 3 - Utilisation des drones professionnels en France.

Les données américaines, basées sur les 500 premiers permis commerciaux

Présent et futur des drones civils



Inspection du Viaduc de Millau



Vérification modules photovoltaïques par thermographie aérienne (EDF ENR)

Fig. 4 - Inspection d'installations par drones.



Surveillance des vignes



Stress hydrique—couverts complexes

Fig. 5 - Les drones au service de l'agriculture.

2. **FAA** : Federal Aviation Administration.
3. **UAS** : Unmanned Aerial Systems.
4. **AUVSI** : Association for Unmanned Vehicle Systems International.
5. **OACI** : Organisation de l'Aviation Civile Internationale.
6. **DGAC** : Direction Générale de l'Aviation Civile.
7. **EASA** : European Aviation Safety Agency.

accordés par la FAA², sont assez comparables (« Snapshot of the first Commercial UAS³ Exemptions », AUVSI⁴).

De nombreux exemples d'utilisations professionnelles de drones ont été présentés, en particulier :

- l'inspection des piliers du viaduc de Millau et la vérification de panneaux photovoltaïques (figure 4) ;
- la surveillance pour l'agriculture du stress hydrique et de la croissance de plantes (figure 5).

Un nouveau marché susceptible de naître dans les prochaines années est celui de la livraison de colis (figure 6) ; la société Amazon s'y intéresse. Notons que la livraison postale par drone est déjà expérimentée pour la desserte de certaines îles de l'Allemagne du Nord par DHL. Ce marché pose toutefois une sérieuse question de réglementation. Plus exceptionnel est le recours à un drone pour déterminer l'état des lieux d'un site fortement contaminé (figure 7).

Une originalité du dossier 40 a été l'analyse conduite par un sociologue, Jean-Philippe Mousnier, concernant la perception des drones par le public. Pour le grand public, un drone est un petit objet se différenciant des avions, associé à la révolution des objets connectés et perçu plutôt comme un jouet. Il existe beaucoup de projets d'innovations dont la plupart sont considérés comme absurdes par le grand public.

Selon la Fédération Professionnelle du Drone Civil, créée en juin 2013, la croissance des activités utiles a été exponentielle en France. Environ 1800 sociétés ont été déclarées opératrices en 2015 (un record mondial), elles opèrent quelques 3000 drones et utilisent 2000 télépilotes. Une réglementation a été mise en place en France (arrêté du 11 avril 2012 mis à jour le 17 décembre 2015), comme dans d'autres pays (63 des 191 pays membres de l'OACI⁵ ont aujourd'hui adopté des réglementations, qui ne sont cependant pas totalement cohérentes). Il s'agit d'un problème critique en raison des quasi-collisions enregistrées au voisinage des grands aéroports ; selon l'université de Bard, 36 quasi-collisions ont eu lieu aux Etats-Unis entre décembre 2015 et septembre 2016 ; pour l'aéroport Roissy-CDG, 7 survols illicites ont été relevés en 2015 et une quasi-collision s'est produite

le 19 février 2016 entre un A320 et un drone. La réglementation DGAC⁶ (figure 8) repose sur 4 scénarii de vol, en distinguant la masse du drone (2 kg, 4 kg ou 25 kg), le vol à vue ou hors vue directe et la zone survolée (cas particulier des villes). Les réglementations britanniques et allemandes présentent certaines similitudes avec la réglementation française. L'EASA⁷ étudie aussi le problème en distinguant les types d'opération : « open » pour les vols les moins risqués avec des drones légers, « specific » pour les vols présentant un certain niveau de risque et « certified » pour les gros drones, chacune de ces catégories se divisant en sous catégories.

Le marché du drone civil se développe donc en dépit de certains obstacles dont les principaux sont : le morcellement du marché entre une multitude d'acteurs, la faiblesse des contrats et des marges asso-



Fig. 6 - Drones pour la livraison de colis. Drone utilisé en avril 2011 pour photographier la centrale nucléaire de Fukushima



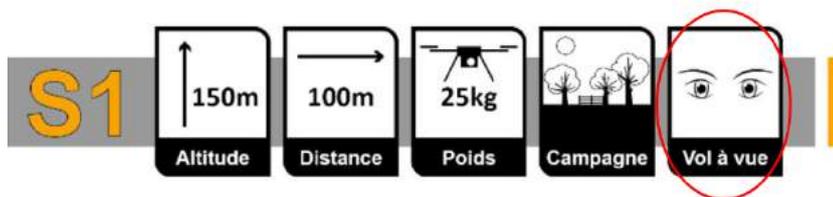
Fig. 7 - L'utilité du drone pour les désastres industriels.

ciées et le manque global de financement. Il existe en parallèle des facteurs de progrès : la miniaturisation des équipements électroniques, le développement du « sense and avoid », l'amélioration de la réglementation, la mise sur pied d'un Conseil pour les Drones Civils et, en vue de sensibiliser les amateurs de drones de loisir, la rédaction de règles d'usage.

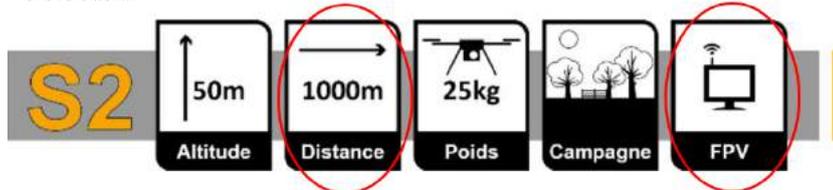
Ministère de la Transition Écologique et Solidaire : Drones, loisirs et compétition, voir le site : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/drones-loisir-et-competition>

Présent et futur des drones civils

► **Scénario S1** : opération en vue directe du télépilote se déroulant hors zone peuplée, à une distance horizontale maximale de 100 mètres du télépilote.

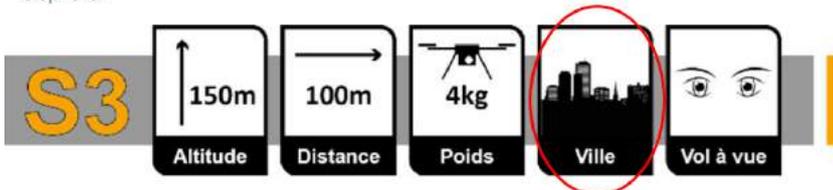


► **Scénario S2** : opération se déroulant hors vue directe, hors zone peuplée, dans un volume de dimension horizontale maximale de rayon d'un kilomètre et de hauteur inférieure à 50 mètres du sol et des obstacles artificiels, sans aucune personne au sol dans cette zone d'évolution.

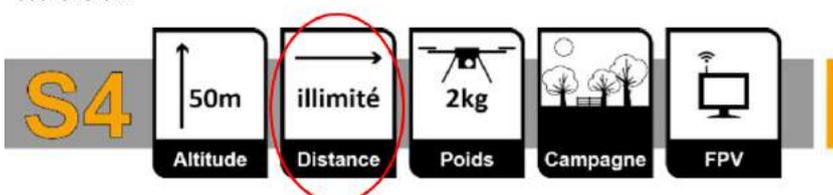


Scénarios de vols en France (1/2)

► **Scénario S3** : opération se déroulant en agglomération ou à proximité de personnes ou d'animaux, en vue directe et à une distance horizontale maximale de 100 mètres du télépilote.



► **Scénario S4** : activité particulière (relevés, photographies, observations et surveillances aériennes) hors vue directe, hors zone peuplée et ne répondant pas aux critères du scénario S2.



Scénarios de vols en France (2/2)

Fig. 8 - La réglementation française pour les drones civils.

des consortia ont déjà été menées en France sous l'égide du SGSDN¹⁰.

À l'issue de la présentation de Thierry Prunier, bon nombre de questions ont été posées. Ne seront mentionnées ci-dessous que les réponses :

- aspects techniques : il faut parler d'autonomie plutôt que de rayon d'action ; l'autonomie peut atteindre deux heures et cinquante kilomètres ; les drones doivent être certifiés plutôt que qualifiés ;
- sécurité : en cas d'incident de survol non intentionnel, le posé doit être privilégié ; la question de l'anticollision est complexe, comme l'a montré une étude européenne ; l'usage d'un drone en milieu urbain doit faire l'objet d'une autorisation préfectorale et le drone doit être équipé d'un système de parachutes ;
- organisations spécialisées : un Conseil pour les Drones Civils est à l'étude sur proposition du pôle AsTech ; trois pôles sont déjà impliqués dans les drones : AsTech, Aerospace Valley et SAFE ;
- marchés : la relation entre grands comptes et TPE est variable, dans la mesure où la rentabilité de l'usage de drones n'est pas encore totalement prouvée ; pour sa part, la SNCF privilégie des démonstrations et des contrats pluriannuels.

Le large panorama présenté par Thierry Prunier a pris en compte tous les aspects des drones civils, depuis les aspects techniques jusqu'aux questions de réglementation. Qu'il en soit vivement remercié.

PK

OUVRAGES :
Les drones : Fonctionnement - Télépilotage - Applications - Réglementation, par Rodolphe Jobard, édition Eyrolles, collection : serial makers, 182 pages, 18 mai 2017 (3e édition), EAN13 : 978.2.21267.434.7.
Des drones à tout faire ! Ce qu'ils vont changer dans ma vie au quotidien par Isabelle Bellin et Sylvain Labbé, éditeur Quae, 200 pages, 2016, EAN13 978.2.75922.530.9.

- 8. H2020** : Horizon2020, programme européen pour la recherche et l'innovation
- 9. SESAR** : Single European Sky Air traffic management Research
- 10. SGSDN** : Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale.

Les recommandations essentielles du dossier n°40 de l'AAE ont porté sur les points suivants :

- la priorité doit être donnée au secteur des drones légers à usage professionnel volant à faible hauteur et au-delà de la visibilité du télépilote, ainsi qu'aux moyens de réduction des risques de collision ;
- la réglementation européenne doit être harmonisée ;
- la R&D européenne mériterait d'être augmentée ; le chiffre de 100 Meuros sur cinq ans a été mentionné (cadres H2020⁸ et SESAR⁹) ;
- la formation des télépilotes doit être formalisée ;
- des techniques de neutralisation des drones présentant un danger sont à développer ; trois études menées par

	Rafale B	Rafale C	Rafale M	M2000-C
Masse Max	24 500 ou 22 500 kg selon les pneumatiques		24 500 kg	16 500 kg
Mach Max	1,6	1,6	1,6	2,2
Plafond	50 000 ft	50 000 ft	50 000 ft	50 000 ft
Carburant Interne	4439 kg (5570 litres)	4722 kg (5925 litres)	4742 kg (5950 litres)	3160 kg (3950 litres)
Poussée Max	2 x 7,5 t	2 x 7,5 t	2 x 7,5 t	10 t
Facteurs de charge	En air / air : +9 g, -3,2 g En air / sol : +5,5 g, -2,4 g			+9 g, -3,2 g
Pts d'emport	14	14	13	9

Fig. 1 - Le M88 a été pensé pour assurer la polyvalence du Rafale.

1. Pack CGP : Le programme M88 Pack CGP (pour coût global de possession), s'appuie sur un contrat d'étude, développement et production consistant à introduire des améliorations techniques pour réduire les coûts de maintenance.

2. TET : Température d'Entrée Turbine.

La conférence a débuté par quelques chiffres significatifs décrivant le M88-2 qui équipe l'avion Rafale :

- la poussée en post-combustion (ou réchauffe) est de 75 kN ;
- la masse du moteur est de 897 kg ;
- la température maximale à l'entrée du distributeur de turbine est de 1850 K ; le M88 est un moteur « chaud » ;
- il faut une heure pour dés-avionner et ré-avionner un moteur ;
- 400 moteurs ont déjà été livrés ;
- 4s sont nécessaires pour passer du régime ralenti au régime plein gaz/post-combustion.

La genèse du programme Rafale a été rappelée. En ce qui concerne le moteur M88, son programme a été lancé en 1986, le premier essai au banc a eu lieu en 1989 et le premier vol sur le Rafale C01, en 1991. Diverses évolutions se sont produites depuis : qualification étape 1 en 1996, qualification étape 4 en 2001, qualification calculateur type 3 en 2006, qualification étape 4 « pack CGP »¹ en 2012.

Les spécifications initiales ont été axées sur la performance pour que l'avion puisse réaliser un large spectre de missions, allant de la pénétration à basse

altitude à l'interception ; le Rafale est un avion polyvalent. La solution retenue pour le moteur est donc un double corps/double flux, avec un rapport de dilution de 0,328, un rapport de compression de 24 et une TET² de 1850 K.

Le M88-2 équipe les trois versions du Rafale, comme le montre la figure 1. L'option bimoteur pour l'avion a été retenue pour améliorer de façon significative la sécurité des vols.

À la date d'avril 2016, 144 Rafale ont été livrés, 400000 heures de vol ont été réalisées et il est à remarquer qu'aucun avion n'a été perdu suite à une défaillance moteur.

Une planche de synthèse particulièrement intéressante a été présentée où sont comparés les quatre moteurs suivants : le Snecma M53 du Dassault Mirage 2000, l'Eurojet Turbo EJ200 de l'Eurofighter Typhoon, le General Electric F414-400 du Boeing F/A-18E/F et du Saab Gripen NG et le Safran M88-2 du Dassault Rafale. Le rédacteur a ajouté à cette liste le Klimov RD33 du Mig29 Fulcrum. Tous ces moteurs militaires se situent dans la même gamme de poussée et sont de conceptions voisines (mis à part le M53) :

- la poussée est de 49,4 kN à 50 kN à sec, et de 75 kN à 90 kN avec post-combustion ;
- le rapport poussée sur poids est de 4,78 à 5,68 à sec, et de 7,87 à 9,27 avec post-combustion ;
- la consommation spécifique est de 75 à 80 kg/kN.h à sec, et 169 à 188 kg/kN.h avec post-combustion.

Le M88-2 se situe en très bonne place par rapport à ses concurrents : il est à la fois léger et compact. Cette performance tient au fait que ce moteur a intégré le meilleur du savoir-faire de Snecma (figure 2). En outre des travaux d'amélioration ont été réalisés depuis la mise en service et se poursuivront pour améliorer la durée de vie et la fiabilité du moteur.

M88: la propulsion du Rafale

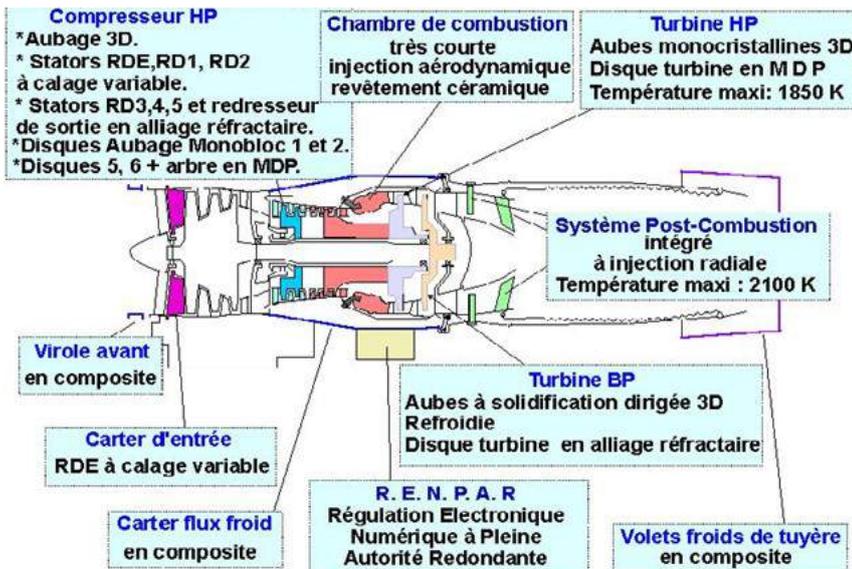


Fig. 2 - Technologies Snecma utilisées sur le M88

3. MTBF : Mean Time Between Failure

4. MTBR: Mean Time Between Removal

5. FCAS: Futur Combat Air System

6. Aube: partie d'une turbine en forme de cuillère ou de pale sur laquelle s'exerce l'action du fluide moteur.

Un découpage en 21 modules :

- 14 modules dits « structuraux » (veine d'air), remplaçables en atelier par échange standard
- 7 modules dits « équipements » pour assurer la régulation et le management thermique, remplaçables en ligne

Ainsi que de nombreuses URL (bougies, boîtiers d'allumage...)

* URL = Unité Remplaçable en Ligne

Les technologies militaires sont de plus déclinées, soit pour des démonstrations et projets militaires (PHT, M88 new), soit pour des moteurs civils (SaM146, TP400), avec la recherche de TET toujours plus élevées.

Une logique de soutien est mise en œuvre pour réduire le Coût Global de Possession, en vue de maintenir une disponibilité maximale pour une contrainte de maintenance minimale. Elle repose, d'une part, sur le découpage du moteur en modules (figure 3), simplifiant la capacité d'accès, et d'autre part, sur un suivi des pièces critiques par des compteurs de potentiel. Une augmentation significative du MTBF³ et du MTBR⁴ a ainsi été démontrée depuis 2012. L'introduction du pack CGP a été relativement rapide puisqu'il n'a fallu qu'un peu plus de quatre ans entre la notification du marché et la livraison du premier moteur pack CGP ; il faut toutefois rappeler que le marché a été précédé de neuf années d'études amont.

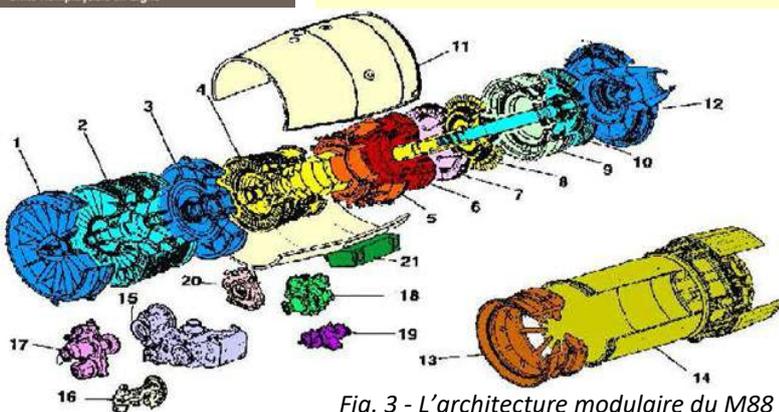


Fig. 3 - L'architecture modulaire du M88

Le moteur M88 possède un fort potentiel d'évolution, que ce soit en reprenant la conception de certains organes, en introduisant de nouvelles technologies ou en adaptant le moteur à de nouveaux aéronaves, par exemple pour le FCAS⁵.

Il y a eu, il y a quelques années, un projet de M88 à poussée accrue (90 kN avec post-combustion), pour un client potentiel du Moyen-Orient, le M88-9 (figure 4). Ce projet n'a pas connu de suite.

Le M88 remplit donc parfaitement sa mission pour le Rafale et possède une architecture permettant l'intégration de nouvelles technologies pour améliorer sa fiabilité et ses performances.

Les questions de l'assistance ont été nombreuses, ne seront retenues ici que les plus significatives :

- **si l'on devait redessiner le M88, que changerait-on ?** Cela dépendrait de la spécification mais on peut penser à des disques aubagés⁵ monoblocs, à l'amélioration des barrières thermiques, à une nouvelle chambre de combustion, à de nouveaux injecteurs ;
- **le moteur doit-il passer souvent au banc d'essai ?** Cela dépend des utilisateurs. L'armée de l'Air ne réalise pas d'essai au point fixe, par contre la Marine Nationale a conservé un banc d'essai à Landivisau et sur le porte-avions Charles de Gaulle ;
- **le M88 peut-il utiliser un carburant alternatif ?** Une campagne d'essais a eu lieu avec un mélange de carburant alternatif et de jet fuel conventionnel ; tout s'est bien passé et une autre campagne d'essais est prévue ; mais il n'y a pas de réel besoin des Armées ;
- **combien d'heures de maintenance pour le Rafale ?** Un Rafale nécessite sept mécaniciens ; le temps de maintenance par rapport au temps de vol n'est pas excessif (ce rapport est de 10 sur le NH90) ; il n'y a pas eu de problème de disponibilité avion pour une cause moteur ;

M88: la propulsion du Rafale



Figure 4 - Le projet M88-9.

vité pourrait être une priorité des Armées ; elle conduirait à repenser l'avion et à supprimer la post-combustion pour limiter la signature Infrarouge.

Cette présentation détaillée, située entre l'avion Rafale et le moteur M88 qui l'équipe, a été précise et passionnante, notamment en ce qui concerne les progrès réalisés depuis leur mise en service. Un grand merci donc aux deux orateurs.

PK

7. SPS : Projection plasma de suspensions.

8. CMC : Composite à matrice céramique.

- **quelles évolutions des matériaux de turbine sont prévues ?** Des recherches sont conduites sur l'alliage AM1, le monocristal à 3 à 5 % de rhénium et les barrières thermiques SPS⁷ ;
- **peut-on penser à l'introduction de CMC⁸ ?** C'est envisageable pour des pièces fixes comme de distributeur de turbine HP ou pour les bras de post-combustion, mais beaucoup moins évident d'un point de vue technique et économique pour des pièces tournantes ;
- **et la poussée vectorielle ?** Elle n'a pas grand intérêt compte tenu de l'évolution des performances des missiles et de la moindre fréquence des combats « dog-to-dog » ;
- **la logique CGP est-elle appliquée à d'autres moteurs militaires ?** Oui au TP400 ;
- **quelles sont les priorités à moyen terme et pour l'environnement ?** Le Rafale est peu furtif à l'arrière. La furti-

RÉFÉRENCES

André Bréand ; **Rafale, la suprématie aérienne** ; André Bréand, Editions Techniques pour l'automobile et l'industrie (ETAI), collection Militaria, 192 pages, paru le 16 juin 2005, EAN13 : 9782726894200.

Germain Chambost ; **Rafale, la véritable histoire** ; éditeur(s) : Le Cherche Midi, Pascal Galodé, 313 pages, paru le 21 octobre 2010, EAN13 : 9782355931031.

Figure 5 - Rafale - RIAT 2012 par Tim Felce (Airwolfhound) via Wikimedia Commons.



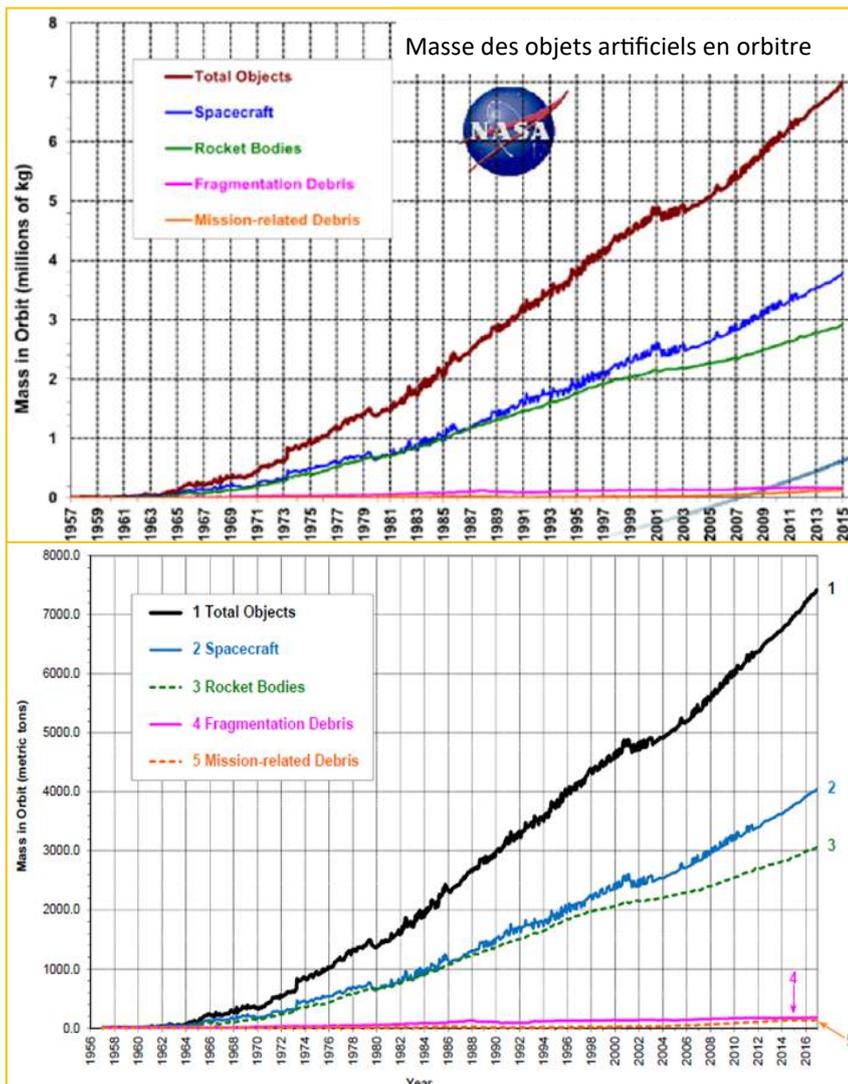


Fig. 1 - Masse des objets artificiels en orbite

Un débris orbital est défini comme un objet orbital artificiel non fonctionnel. Déjà le premier satellite artificiel de la Terre, Spoutnik 1, lancé le 4 octobre 1957, a été un débris orbital pendant les trois quarts de sa vie. L'évolution de la population orbitale cataloguée (objets supérieurs à 10 cm en orbite basse et à 1 m en orbite géostationnaire) a pu être récapitulée tous les cinq ans de 1960 à 2015. Elle ne fait qu'augmenter malgré la diminution du nombre de lancements annuels de satellites (140 en 1969, 52 en 2005) pour atteindre près de 20.000 objets catalogués, parmi les-

quels des satellites actifs (6 %) et des satellites hors service (18 %), des étages supérieurs de lanceur (12 %), des débris issus d'opérations spatiales (11 %) et des fragments très nombreux (53 %).

Il existe à ce jour environ 29 000 objets de plus de 10 cm en orbite terrestre, selon le catalogue MASTER de l'ESA, plus de 720 000 débris de plus d'un cm et plus de 135 millions de débris de plus d'un mm. Ces nombres sont appelés à augmenter, comme le montre la figure 1, malgré une relative stabilisation du nombre annuel de lancements et malgré les efforts réglementaires développés depuis près de vingt ans.

Les objets spatiaux artificiels ne sont pas répartis uniformément dans l'espace, certaines orbites étant plus occupées que d'autres. Les orbites « critiques » sont :

- des orbites basses fortement inclinées à plus de 700 km d'altitude (pics à 800 et 1500 km) ;
- l'orbite géostationnaire.

Les débris spatiaux proprement dits ont différentes origines :

- les débris issus des opérations spatiales (capots d'optiques, sangles, ...) ;
- le vieillissement accéléré des matériaux dans l'espace (protections thermiques, cellules électriques, mylars, ...) ;
- la fragmentation accidentelle d'étages supérieurs (par exemple Ariane V16 en 1986, HAPS Pegasus XL en 1996) ;
- la fragmentation volontaire due à des essais d'armes antisatellite ; le cas le plus significatif est la destruction du satellite chinois Fengyun en 2007, qui a généré plus de 3 000 débris ;
- des collisions entre objets spatiaux. Le cas le plus connu est la collision intervenue entre Iridium 33 et Cosmos 2251. En tout cinq collisions ont été prouvées et 64 ont été suspectées.

Chacun de ces événements se traduit par une augmentation discontinue des débris orbitaux.

Débris spatiaux, comment s'en débarrasser....



Fig. 2 - Fragments d'un second étage de Delta2 retrouvés au sol

1. CEI : Communauté des États Indépendants

2. COO : Centre d'Orbitographie Opérationnelle

Christophe Bonnal a rejoint le CNES/DLA en 1992, sa principale activité actuelle porte sur les projets futurs comme les lanceurs futurs post-Ariane 6, la réutilisation ou les petits lanceurs. Il est en outre le président de la Commission Débris de l'IAA (International Academy of Astronautics). C'est donc un expert internationalement reconnu du sujet des débris spatiaux qui nous a fait l'honneur de donner cette conférence.

La France serait le quatrième contributeur mondial aux débris en orbite, mais très loin derrière la CEI¹, les Etats-Unis et la Chine.

La seconde partie de la présentation a été consacrée aux événements redoutés qui résultent de l'existence d'objets et débris en orbite. Le premier d'entre eux est une rentrée atmosphérique non contrôlée. En effet les orbites s'usent à cause de la traînée atmosphérique, très dépendante de l'altitude et du temps et des perturbations gravitationnelles. La phase finale d'une rentrée atmosphérique se traduit par une fragmentation de l'objet, que ce soit un étage supérieur, un satellite ou un gros débris et par échauffement cinétique susceptible de faire fondre certains éléments. Pour les grosses structures telles que les stations spatiales comme Skylab (80 t en orbite) ou Mir (140 t en orbite), 10 à 20 % de la masse ont atteint la surface terrestre. Le point final d'arrivée est difficile à prévoir : la prévision est de $\pm 10\%$ du temps restant ; la veille d'une rentrée, par exemple, la prévision est de l'ordre de $\pm 2,5$ h soit ± 56.000 km. Une erreur de 2 minutes sur l'instant de rentrée entraîne une erreur de 1 000 km pour le point de chute dans le cas d'une rentrée non contrôlée. De nombreux exemples ont été présentés : la rentrée de Saliout 7 en Amérique du Sud, celles d'un second étage de Delta 2 au Texas le 22 janvier 1997 et en Afrique du Sud le 27 avril 2000 (figure2), ainsi que d'autres cas au Niger, en Arabie, au Brésil et en Ouganda (récupération d'une sphère d'Ariane V19). Globalement il rentre 2 à 3 objets catalogués par jour, 2 gros objets intègres par semaine ; pour le moment aucune victime n'est à déplorer (une femme touchée sans gravité lors d'une rentrée au Texas).

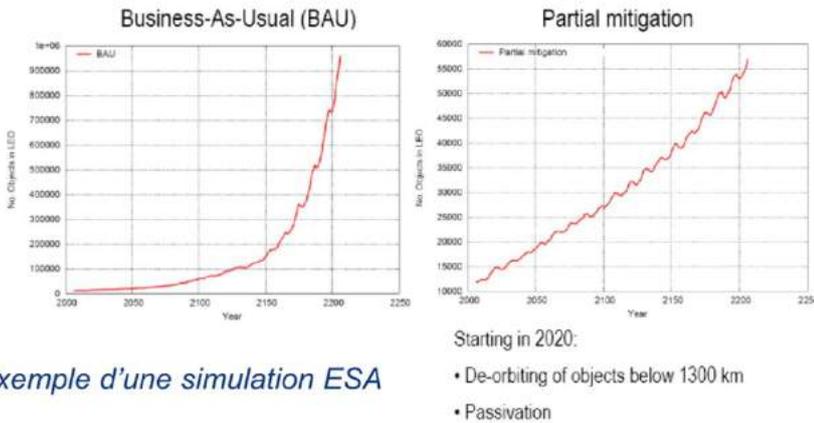
Le second type d'événement est la collision entre satellites ou la collision entre un satellite et un débris. Il existe des moyens de suivi des satellites en orbite et des moyens de calcul permettant une certaine prévision des collisions potentielles, par exemple à la NASA et au CNES ; il existe aussi des possibilités de manœuvre sur des satellites opérationnels permettant d'éviter une collision. Ainsi en 2015 il y a eu une manœuvre tous les trois jours et 4 manœuvres intéressant l'ISS. Prévoir les collisions est la principale tâche du COO² du CNES à Toulouse. La rencontre entre deux objets placés sur des orbites différentes met en jeu des énergies cinétiques considérables, de l'ordre du MJ si l'objet impactant un satellite a une taille d'un cm ; dans ce cas le satellite est détruit et génère de nombreux débris. Si l'objet impactant a une taille d'un mm, il est probable que le satellite sera affecté dans certaines de ses fonctions. Quelques exemples de modélisations de collisions sont présentés (Spot 5 et Sentinel 1 pour l'Europe).

Le syndrome de Kessler a fait l'objet de la troisième partie de la conférence. Donald J. Kessler est un consultant de la NASA qui a défini en 1978 un scénario spécifiant que si le volume de débris spatiaux dépassait un certain seuil, alors le nombre de débris et la probabilité de collisions augmenteraient de façon exponentielle et rendraient impossible l'exploration spatiale et l'usage des satellites. Il est facile de comprendre pourquoi à partir d'un simple bilan des débris :

- d'un côté, il existe un nettoyage naturel dû à l'atmosphère résiduelle ; ce nettoyage est rapide pour les orbites basses (de l'ordre d'un an pour les apogées inférieures à 300 km) et très long pour les orbites géostationnaires (de l'ordre d'un million d'années) ;
- de l'autre côté, il y a une production continue de débris, surtout pour les orbites basses, à cause de ce qui s'apparente à une réaction en chaîne.

En conséquence une instabilité s'installe pour laquelle on a gardé le nom de syndrome de Kessler. Certaines orbites basses, plutôt encombrées (à 700, 1 000 et 1 500 km) sont plus sensibles à ce syndrome. La simulation numérique permet une prévision de l'évolution du nombre d'objets en orbite d'une taille donnée.

Débris spatiaux, comment s'en débarrasser....



Exemple d'une simulation ESA

Fig. 3 - Une vue synthétique de l'évolution de la pollution spatiale (ESA)

3. NASA-JSC : Johnson Space Center

4. Qinetiq : entreprise d'armement et de recherche militaire britannique

5. ESA Delta : mission spatiale ayant eu lieu en 2004 avec pour objectif différentes expériences scientifiques

6. CNUCED-Italie : conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement ayant eu lieu en Italie

7. JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency

8. IADC : Inter-Agency space Debris Coordination Committee

Cependant les résultats obtenus sont dépendants de nombreuses hypothèses concernant les explosions accidentelles et les collisions et donc les modèles de densité orbitales (NASA-JSC³, Qinetiq⁴, ESA Delta⁵, CNUCED-Italie⁶, JAXA⁷, CNES), aboutissent à des résultats dispersés. Mais des tendances peuvent être proposées. Si rien n'est fait (figure 3, « business as usual »), la situation peut devenir catastrophique, par contre elle peut être relativement maîtrisée si des mesures de mitigation sont prises, par exemple en désorbant les objets hors service en dessous de 2000 km et en « passivant » les débris.

Il existe au plan international de nombreux standards, codes de bonne conduite et lois pour limiter la production des débris spatiaux ; ils sont dérivés des recommandations de l'IADC⁸ :

- IADC guideline (2002) ;
- UN guidelines (2007) ;
- Europe Code of Conduct (ASI-BNSC-CNES6DLR-ESA, 2004) ;
- standard ISO 24113 et documents de support (2012) ;

- standards nationaux (NASA, JAXA, CNES, ESA) ;
- loi française LOS sur les opérations spatiales (2010).

Les mesures préconisées sont de bon sens. Il faut à court terme minimiser les débris opérationnels, passiver en fin de vie les objets utilisés, pour éviter les explosions et protéger les zones vitales en LEO et GEO. Pour le long terme, il convient de penser à la désorbitation systématique en fin de vie. Mais cela ne suffira pas : pour stabiliser l'environnement spatial, certaines agences estiment qu'il faudrait retirer 5 à 10 gros objets en orbite basse par an en plus d'un respect scrupuleux de la réglementation en vigueur.

D'un point de vue prospectif, des solutions potentielles de retrait actif de satellites hors d'usage et de débris spatiaux ont été envisagées. Ces solutions sont classées selon les techniques utilisées :

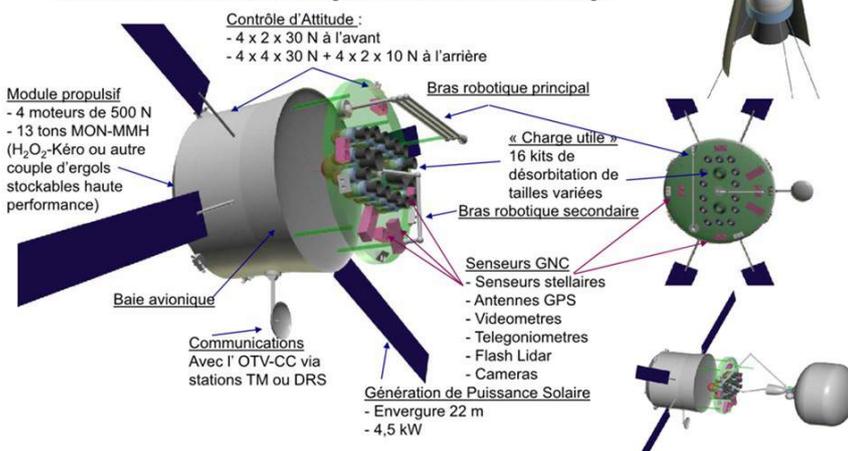
- destruction de petits débris par laser de puissance aéroporté ou orbité ;
- augmentation de la traînée atmosphérique par des voiles ou des ballons (orbites basses) ;
- câble électrodynamique ;
- capture et désorbitation, une solution complexe pour les petits débris en rotation mais bien adaptée aux objets en GEO.

Chacune de ces solutions suppose de satisfaire certaines fonctions comme le rendez-vous entre le chasseur et l'objet à éliminer, l'interfaçage entre le chasseur et l'objet, la réorientation de l'objet et enfin la désorbitation active. Certaines de ces fonctions n'ont pas encore été réalisées à ce jour et nécessiteront des travaux de fonds. Un concept de satellite « éboueur » a été étudié par le CNES (figure 4). Dérivé de l'ATV, c'est un satellite lourd. Il existe aussi un projet ESA Clean Space (figure 5) qui s'intéresse en particulier au satellite Envisat, qui a cessé de fonctionner en mai 2012 et se trouve sur une orbite synchrone à 800 km. Le retrait actif de débris orbitaux est donc une source potentielle de technologies innovantes susceptibles de mobiliser les énergies. Le problème comporte des composantes techniques et économiques mais pas seulement : il y a des barrières politiques (peut-on intervenir sur des satellites militaires ?), et des questions de

Fig. 4 - Le concept CNES de satellite chasseur de débris

• Concept étudié au CNES :

- Dimensions : diamètre 4,57 m ; longueur 6 m ; 17 tonnes au décollage



Débris spatiaux, comment s'en débarrasser....

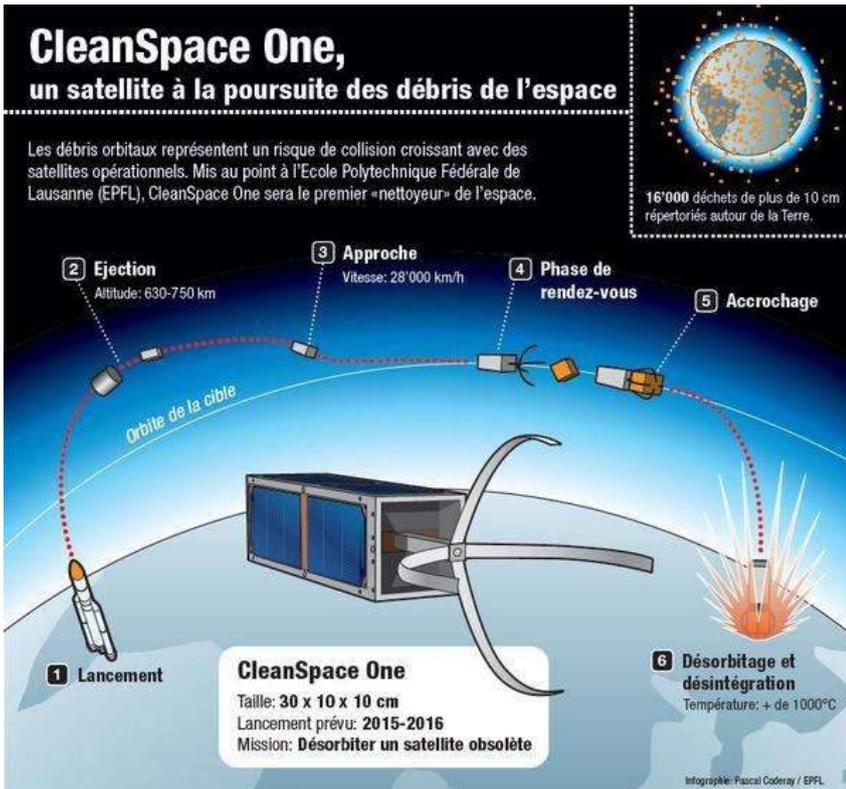


Fig. 5 - Le projet Clean Space

9. OneWeb : projet de constellation d'environ 650 satellites de télécommunications circulant sur une orbite basse pour fournir aux particuliers un accès mondial à Internet à haut débit à partir de 2022.

législations et d'assurance. Donc rien ne se fera sans une réelle révolution des mentalités.

La conclusion de Christophe Bonnal a mis en exergue les points suivants :

- les orbites basses vont plutôt mal et la prise de conscience internationale est plutôt modérée, pour ne pas dire plus ;
- il y a certaines incohérences entre paroles et actes ; ainsi un bon nombre d'étages supérieurs ne sont pas passivés ;
- l'évaluation économique des mesures proposées tarde à venir, de même qu'un plan de R&T à la hauteur de l'enjeu.

Faute de temps, il n'a pas été possible de clore la conférence par la traditionnelle séance de questions-réponses. L'une des rares questions a porté sur l'impact potentiel des méga-constellations type OneWeb⁹ (figure 6) : il faut espérer que la réglementation existante sera respectée.

Cette conférence a été de qualité et on ne peut que saluer la grande honnêteté intellectuelle de l'orateur qui n'a rien caché des difficultés à surmonter pour éviter que l'espace proche de notre Terre ne devienne une poubelle.

PK

RÉFÉRENCES

Christophe Bonnal, «Pollution spatiale, l'état d'urgence» , éditions Belin, août 2016, 240 pages, ISBN 978-2-7011-5792-4.



Fig. 6 - Le projet de méga-constellation OneWeb



Mardi 20 Septembre 2016 de 18h30 à 20h00

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris



Fig. 1 - La première Navette Columbia sur son pas de tir, NASA (NASA/KSC, Image ID: KSC-81PC-0136).

1. Konstantin Tsiokolsky (1857-1935) : scientifique russe puis soviétique considéré comme le père de l'aéronautique moderne.

2. ATK : entreprise américaine de 17000 personnes, spécialisée dans les secteurs de l'armement et de l'aérospatiale, qui a fusionné avec la société Orbital Sciences Corporation en février 2015 pour former Orbital ATK.

3. Columbia, Challenger, Discovery, Atlantis, Endeavour : les 5 navettes américaines conçues depuis 1976.

L'orateur travaille actuellement dans l'industrie du transport spatial après avoir fait une première partie de sa carrière au CNES. Il a étudié depuis 2004 les concepts avancés de lancement spatial.

Le sujet présentant une certaine sensibilité industrielle, dans un contexte de compétition économique entre lanceurs spatiaux, Pascal Bultel a été amené à proposer une synthèse historique des projets de lanceurs réutilisables développés depuis de nombreuses décennies et d'apparaître comme l'un des experts de la commission technique « Exploration et Transport Spatial » de la 3AF.

La quasi-totalité des lanceurs spatiaux opérationnels sont aujourd'hui des lanceurs consommables (expendable), c'est-à-dire qui ne servent qu'une fois. Dans une époque marquée par une surcapacité mondiale de lancement, le coût de lancement et la fiabilité jouent un rôle primordial dans la compétition entre lanceurs. L'idée de réaliser des lanceurs à plusieurs étages est née dès le début du vingtième siècle (Konstantin Tsiokolsky¹) et les pionniers de l'aéronautique se sont aperçus très tôt de la grande difficulté technologique pour réaliser une satellisation en orbite terrestre avec un seul étage (SSTO

pour Single Stage To Orbit) et que le bi-étage (TSTO pour Two Stages To Orbit) était plus accessible. Il y a cependant eu beaucoup de projets de SSTO, certains en outre réutilisables ; aucun n'a encore vu le jour.

Il convient de rappeler une courte définition du concept de lanceur réutilisable : il s'agit d'un lanceur, chargé de mettre une charge utile en orbite terrestre, civile ou militaire, dont l'un des éléments constitutifs majeurs peut être récupéré et réutilisé. Cet élément peut être un premier étage ou une partie de celui-ci ou l'étage supérieur. L'exemple le plus connu de lanceur partiellement réutilisable est la navette spatiale (Space Shuttle) américaine (**figure 1**) : les deux propulseurs à propergol solide (SRM) étaient récupérés par parachute et réaménagés par Thiokol (devenu ATK²), ainsi que la navette proprement dite capable de revenir de l'orbite par ses propres moyens, d'atterrir et de revoler ultérieurement (Columbia, Challenger, Discovery, Atlantis, Endeavour³). La démonstration de la récupération/réutilisation a été réussie mais à un coût tel que cette technologie a été abandonnée en 2011, au profit d'un retour aux lanceurs consommables.



Pascal Bultel, à la mairie du 15ème.

Pourquoi l'idée de la réutilisation revient-elle d'actualité ? Il s'agit aujourd'hui, dans une conjoncture très concurrentielle, de

Les lanceurs réutilisables

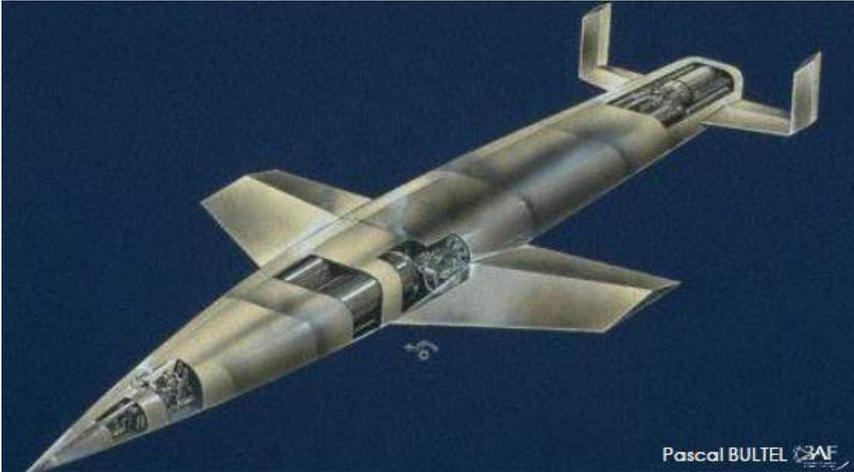


Fig. 2 - Le concept Silbervogel vers 1944.

4. Space X : Space Exploration Technologies Corporation, entreprise américaine fondée en 2002 par Elon Musk (automobiles Tesla).

5. Blue Origin : société créée en 2000 par Jeff Bezos, fondateur d'Amazon pour développer de nouvelles technologies capables d'abaisser le coût d'accès à l'espace.

6. Space Shuttle : navette américaine comme Columbia, Challenger.

7. X37 : prototype de navette spatiale sans équipage développé par la NASA.

8. X38 : véhicule de retour d'équipage pour la station spatiale internationale ISS.

réduire considérablement le coût de lancement, d'augmenter parallèlement la disponibilité des lanceurs et de développer de nouvelles applications ou de nouvelles capacités. Les percées récentes réalisées par Space X⁴ et Blue Origin⁵ (retour vertical du lanceur) ont accéléré la dynamique. Certains lanceurs visant le tourisme spatial sont par nature récupérables et réutilisables, ils constituent un secteur d'activité qui mériterait en lui-même une présentation spécialisée. La conférence a été pour sa part focalisée sur les lanceurs réutilisables pour la mise en orbite terrestre d'une charge utile.

L'orateur a pu identifier plus d'une centaine de concepts sur une durée approchant le siècle et sa présentation, d'une grande richesse iconographique, est impossible à reproduire ici dans son intégralité. Aussi, le rédacteur de ce compte-rendu a-t-il décidé de proposer une synthèse de ces multiples projets avant

d'aborder la problématique moderne des lanceurs réutilisables.

Les concepts passés, dont très peu ont donné lieu à des démonstrations, et encore moins à des systèmes opérationnels, peuvent être schématiquement classés en ceux visant la récupération/réutilisation de l'étage supérieur et en ceux portant sur la récupération/réutilisation du ou des étages inférieurs. Un certain nombre de ces projets ont utilisé un dispositif d'accélération par rail, comme le bombardier antipodal Silbervogel d'Eugen Sänger et Irene Sänger-Bredt (**figure 2**) ou son avatar soviétique (bombardier Keldysh de 1946). Ces projets militaires n'ont pas été concrétisés et on peut penser que l'infrastructure à développer au sol possédait certaines limitations pour les missions prévues.

La plupart des étages supérieurs réutilisables sont du type « orbital spaceplane ». Il s'agit de véhicules ailés capables de « décrocher » d'une orbite pour revenir sur Terre, y atterrir ou être récupérés par parachutes. Les véhicules doivent donc posséder de réelles qualités aérodynamiques dans les domaines hypersonique, supersonique, transsonique et subsonique. Ils peuvent servir de moyen de satellisation d'une charge utile ou pour d'autres types de mission militaire ou civile (par exemple comme le CRV, pour Crew Rescue Vehicle). Le Space Shuttle⁶ avait par exemple une capacité de lancement de 27,5 t en orbite basse à 204 km, de 16,1 t en orbite de 407 km et de 3,8 t en orbite GTO. L'Union Soviétique a développé entre 1980 et 1993 sa propre navette spatiale, désignée Buran pour tempête de neige, (**figure 3**) et lancée par la fusée Energyia. Cette navette a effectué un seul vol automatique. On connaît aussi le projet américain Dyna-Soar (lanceur Titan) et les projets européens Hermes (Ariane 5) et Horus (second étage du Sänger 2). Il y a aussi eu de nombreux développements de petites navettes telles que les X37⁷ / X38⁸ aux États-Unis et les Mig 105, Spiral et Bor en Union Soviétique.



Fig. 3 - Navette soviétique Buran, source BURAN, auteur Anna Zvereva from Tallinn, Estonia, (17433008202) 29 avril 2015.

Les lanceurs réutilisables



Fig. 4 - Le démonstrateur DC-X (A).

9. Propergol : produit de propulsion constitué d'un mélange de comburant et de combustible désignés ergols.

10. Virgin Galactic : compagnie du Virgin Group du milliardaire Richard Branson dont le principal objet est de vendre au public des vols sub-orbitaux.

11. ULA pour United Launch Alliance : entreprise américaine constituée en Société à Responsabilité Limitée créée par Boeing et Lockheed Martin pour développer les lanceurs spatiaux Atlas V, Delta II et Delta IV.

12. Adeline pour ADvanced Expendable Launcher with INnovative engine Economy : projet de fusée réutilisable du constructeur aéronautique européen Airbus Defence & Space; annonce faite le 8 juin 2015.

La réutilisation du ou des étage(s) inférieur(s) a donné lieu à une grande variété de formules :

- pour délivrer une grande poussée au décollage, on utilise dans plusieurs pays (sauf en Russie et en Chine) des moteurs à propergol⁹ solide (SRM aux États-Unis, MPS en Europe, « boosters » ou accélérateurs); la réutilisation de ce type de moteur a été réalisée sur le Space Shuttle, elle a été envisagée sur Ariane 5 puis abandonnée; en fait, la récupération par parachutes se fait en mer, ce qui impose un système logistique assez lourd et finalement l'intérêt économique n'est pas atteint ;
- le lancement peut être aéroporté, c'est-à-dire que le premier étage est un avion piloté (projet Launcher One de Virgin Galactic¹⁰) ou automatique (projet Eole ONERA/CNES); cette formule assez flexible a certainement un avenir pour le lancement de petits satellites; il a aussi existé de nombreux projets de lanceurs utilisant un premier étage à propulsion aérobique ; cela a été le cas pour le TSTO Sänger 2 de MBB (1988-1993), avec un premier étage à turbostatoréacteur, et pour le SSTO X30 NASP de Rockwell (1990-1993); HOTOL et aujourd'hui Skylon sont de la même veine ;
- la récupération d'un premier étage équipé d'ergols liquides peut être économiquement intéressante étant donné que le coût de ces moteurs

est élevé et que leur conception d'origine peut prévoir la réutilisation; plusieurs technologies ont été imaginées :

- par parachute,
- par rotor : projet « Recoverable S-V » d'Hiller (1965),
- retour des boosters à l'aide d'ailes et de moteurs aérobiques : projet Baïkal de Khrounichev,
- retour propulsé vertical; cette technologie a été étudiée par McDonnell-Douglas de 1991 à 1993 pour le projet Delta Clipper et a donné lieu à quelques vols du démonstrateur DC-X (A) (figure 4); c'est la technologie reprise par Space X pour le Falcon 9 et par Blue Origin pour le New Shepard ;

- en ne récupérant que quelques parties critiques dont les moteurs.

Les concepts sur lesquels reposent aujourd'hui les recherches et les développements sont les suivants :

- réalisations et démonstrations en cours : Space X a réussi plusieurs récupérations du premier étage du Falcon 9, soit sur barge en mer, soit sur terre au voisinage du site de lancement; la réutilisation d'un premier étage est prévue dans les prochains mois; Blue Origin a réussi plusieurs retours verticaux de son New Shepard destiné au tourisme spatial; le X37B, petite navette réutilisable, a fait quelques vols ;
- en développement : Virgin Galactic pour le Launcher One (lancement aéroporté) et Starcraft Boosters Inc. (premier étage ailé atterrissant horizontalement) ;
- projets : Space X prévoit d'appliquer la technologie du retour vertical à son lanceur lourd Falcon Heavy et à son lanceur superlourd ITS (Interplanetary Transport System), Blue Origin à son futur lanceur New Glenn, ULA¹¹ prévoit la récupération de la baie propulsive du premier étage de son lanceur Vulcan, Airbus a un projet Adeline¹² ;
- long terme : le projet de SSTO Skylon de Reaction Engines Limited (figure 5), soutenu par le gouvernement

Les lanceurs réutilisables

britannique et l'ESA est un lanceur à décollage-atterrissage horizontal reposant sur une variante de la technologie de propulsion LACE (Liquified Air Combined Engine).



Fig. 5 - Le projet Skylon.

La présentation PowerPoint de cette conférence est téléchargeable dans l'[espace adhérent / pages du groupe IdF](#) (accès réservé aux Membres du groupe IdF 3AF) via le lien <http://goo.gl/TWS8eF>.

À l'issue du long rappel des différents concepts étudiés et pour un petit nombre d'entre eux développés et devenus opérationnels (environ 500 missions ont fait l'objet de réutilisations partielles), Pascal Bultel a proposé une synthèse de la problématique abordée et des voies qui, selon lui, ont freiné jusqu'à présent les développements.

Jusqu'à aujourd'hui, les lanceurs réutilisables se sont en effet heurtés à de nombreuses difficultés tenant principalement aux opérations et aux aspects réglementaires, notamment pour la sécurité. La réutilisation induit inexorablement une perte de performance par rapport aux lanceurs consommables et si on examine le problème sous le seul angle économique, en utilisant comme macro-indicateur le coût du kilogramme mis en orbite, le résultat pour la réutilisation n'est pas au rendez-vous. Essayons de détailler ces différents problèmes.

En premier lieu, il convient de rappeler que les solutions à mettre en œuvre dépendent des profils de mission visés. Il n'existe donc pas une solution optimale générale.

La récupération se paye par des masses

supplémentaires. Ainsi pour le retour vertical du Falcon 9 (**figure 6**), il faut prévoir de l'ordre de 30 tonnes d'ergols, ce qui induit une perte sensible de performance par rapport à un lanceur consommable. En outre, une récupération économique suppose le retour au voisinage du point de lancement pour réduire la logistique et donc complique la technologie.



Fig. 6 - Falcon 9 (société Space X), crédit NASA/Glenn Benson, via Wikimedia Commons.

Il existe des contraintes liées aux flux thermiques développés dans la phase de retour. C'est bien connu pour une navette spatiale (exemple du Space Shuttle) mais c'est aussi le cas pour un retour vertical par rétro-poussée pour un premier étage :

Les lanceurs réutilisables

les moteurs supporteront-ils l'échauffement cinétique ? Cela paraît possible pour un retour à partir de Mach 6 mais plus difficile à partir de Mach 8. La réutilisation va donc avoir un impact déterminant sur l'étagement.

L'orateur a tenté de résumer sa pensée sur une planche synthétique (figure 6). En abscisse est porté le nombre de Mach de fin de fonctionnement d'un premier étage et en ordonnée, l'angle d'incidence à la rentrée atmosphérique. Les différentes contraintes rencontrées sont mentionnées, les plages de couleur indiquent, du rouge sombre au vert, la sévérité des problèmes rencontrés. Il se dégage, pour un niveau moyen de difficulté, deux possibilités : soit le retour vertical (XXVL), solution adoptée par Space X et envisagée par Blue Origin pour le New Glenn, soit le retour avec atterrissage horizontal (XXHL) (figure 7). PK

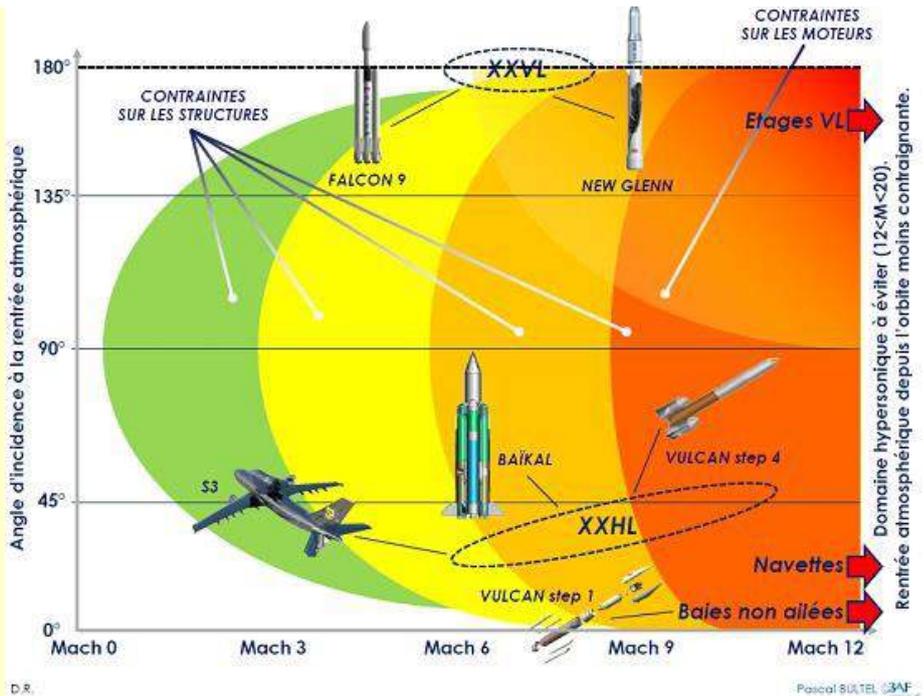


Fig. 7 - Positionnement des concepts de réutilisation, angle d'incidence à la rentrée atmosphérique en fonction du nombre de Mach (0—12).

Navette Discovery après le retour d'un vol, source NASA, 2005, Lori Losey .



L'Association Française des Femmes Pilotes

Adriana Domergue, *présidente de l'Association*

Mardi 6 Décembre 2016 de 18h30 à 20h00

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris



dant de bord. Dans l'armée, Isabelle Bousaert devient la première femme pilote militaire en 1985 et le 28 mai 1999, Caroline Aigle est à 25 ans, la première femme pilote de chasse française. En 2001, Béatrice Vialle devient la première femme à piloter l'avion supersonique Concorde. Depuis, le nombre de femmes pilotes professionnelles, dans les secteurs civil et militaire, n'a cessé de croître.

La France compte ainsi aujourd'hui près de 3000 femmes pilotes, soit 7% du nombre total de licenciés. Ce chiffre reste hélas encore insuffisant. L'essentiel des formations des pilotes s'effectuant au sein des 630 aéroclubs répartis sur le territoire, l'Association travaille avec la Fédération Française d'Aéronautique (FFA) pour promouvoir et soutenir financièrement les vocations féminines.

Une journée nationale de "l'Aviation au Féminin" a ainsi été organisée pour la première fois le 11 mai 2008 en partenariat avec la Fédération Française d'Aéronautique (FFA) dans tous les aéroclubs partenaires. Puis en 2011 a été initié le rassemblement annuel et national des

L'association Française des Femmes Pilotes (AFFP) a été créée en 1971 à l'initiative de Jacqueline Golay, Anne-Marie Peltier, Danielle Decure, Nicole Demarle, Marie-Josèphe de Beauregard et de deux autres pilotes privées qui avaient pris conscience de l'isolement des femmes dans l'aviation.

La représentativité des femmes françaises dans la profession de pilotes n'avait pas suivi celle des femmes pilotes américaines, anglaises et allemandes et un regroupement devenait nécessaire pour assurer leur intégration et leur avenir dans la profession. Aux États-Unis, Amélia Earhart avait fondé en 1936 les « 99 », les pilotes anglaises, la « BWPA » en 1955 et les pilotes allemandes, la « Vereinigung Deutscher Pilotinnen EV » en 1968. En France, le concours de l'ENAC (École Nationale de l'Aviation Civile) n'a été ouvert aux femmes qu'à partir du 13 janvier 1973.

Depuis cette date et sous l'influence de l'AFFP, des progrès significatifs ont été obtenus. Dans l'aviation civile, Jacqueline Dubut devient ainsi la première femme pilote de ligne à Air Inter et Danièle Decuré la première femme à devenir comman-



Adriana Domergue à la mairie du XVème.

Femmes de l'Air dont la prochaine édition aura lieu les 2 et 3 septembre sur l'aérodrome de Blois Le Breuil, LFOQ. Édith Kel-



Élise Deroche, née le 22 août 1882 dans le 4ème arrondissement de Paris et décédée le 18 juillet 1919 au Crotoy, est la première aviatrice brevetée au monde. Initiée au pilotage par Charles Voisin (*entreprise Voisin Frères*), elle obtient le brevet de pilote n°36 le 8 mars 1910.

Une plaque commémorative est apposée au 61, rue de la Verrerie à Paris.

L'Association Française des Femmes Pilotes



De gauche à droite : Murielle Le Floch, Secrétaire Générale de l'AFFP ; Annie Monnier, aéroclub Renault ; Adriana Domergue, Présidente de l'AFFP et Odile Chartier, Secrétaire Générale adjointe.



Adresse postale : Association Française des Femmes Pilotes, 6 rue Galilée, 75116 Paris.
Téléphone : 06 42 99 46 22
Site web : <http://www.femmes-pilotes.com/>
Contact Ile-de-France :
Murielle Le Floch, par email affp.iledefrance@orange.fr.

ler, Présidente Directrice Générale de Carlin International ayant présidé le 9ème Grand Prix de l'Innovation de la Foire de Paris en 2014, sera la Marraine de l'événement.

L'Association regroupe des femmes modernes, pilotes privées ou professionnelles, issues de tous les secteurs économiques et industriels, conscientes de partager une passion ou un métier toujours aussi mythique et exigeant. Elle mène des actions d'assistance, de bienfaisance et offre des bourses au profit de jeunes femmes méritantes qui souhaitent accéder à l'un des métiers ou l'une des filières, professionnel(le)s ou non, de l'aviation. L'AFFP organise également des stages, des voyages ou des conférences et réunit les femmes et leurs conjoints ou amis dans un esprit convivial et chaleureux. Les rencontres sont des lieux d'échanges où pilotes, professionnelles et privées, peuvent faire part de leur ambition, partager leurs expériences et progresser.

La présentation s'est terminée par un échange de questions-réponses qui a permis aux membres de deux associations, 3AF et AFFP, de découvrir leurs nombreux

points communs. Les uns imaginent, conçoivent, testent, certifient les avions tandis que les autres les pilotent par plaisir et passion. PG

Les Publications

- *Ma formation de pilote privé d'avion*, Annie Lecomte-Monnier - Éditeur : Maxima, <https://www.maxima.fr/>. L'auteure a reçu le 10 avril dernier le diplôme de l'AéroClub de France pour cet ouvrage.
- *Cent ans d'aéronautique au Val de Gally*, Michèle Bondin-Seignette - Édition Fontenay d'Hier à Aujourd'hui disponible auprès de <http://www.fha-assos.org>
- *Au vent des hélices*, Michèle Bondin-Seignette - Éditeur : <http://www.leseditionsdelofficine.com/>
- *Les ailes du défi*, Daphné Desrosiers - Éditeur : <http://www.editions-menges.com/>
- *Almanach de l'aviation*, Daphné Desrosiers - Éditeur : <http://www.editions-menges.com/>

PROCHAIN RASSEMBLEMENT DES FEMMES DE L'AIR : les 2 et 3 septembre 2017 sur l'aérodrome de Blois Le Breuil.



Christine Debouzy, pilote commandant de bord A380 et Trésorière Générale de l'AFFP lors de la séquence Questions/Réponses.

ARIANE 6, une nouvelle dynamique

Alain Charmeau

Président Directeur Général d'Airbus Safran Launchers

Mardi 21 Février 2017 de 18h30 à 20h00, salle Saint-Lambert

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris



Alain Charmeau, Président Directeur Général d'Airbus Safran Launchers.

Alain Charmeau a été Directeur des Programmes, en charge de la maîtrise d'œuvre du développement des missiles ASTER de 1993 à 1997, Directeur des Programmes Systèmes de Défense Aérienne et membre du Comité Directeur de MBDA, Directeur de la Business Line Défense en charge de la maîtrise d'œuvre des missiles balistiques à partir de 2003, Directeur Général de Space Transportation au sein d'Astrium en 2005 et est depuis juillet 2014 Directeur des Opérations de Space Systems au sein d'Airbus Defence and Space.

Cette conférence a été exceptionnelle à plus d'un titre : la personnalité de l'orateur, l'introduction faite par le président de 3AF, Michel Scheller et une assistance nombreuse et passionnée. Plutôt qu'une conférence parlant spécifiquement des technologies qui seront mises en œuvre sur le futur lanceur européen Ariane 6, l'orateur s'est attaché à en expliquer le pourquoi et le comment.

1. L'HISTOIRE D'ARIANE 6

La saga Ariane commence en 1979, Aerospatiale envisage déjà à cette date une famille de lanceurs Ariane 1 à 5, dont une version Ariane 5 transportant une navette spatiale européenne désignée Hermès. Seules les Ariane 1 à 4 voleront, avec un excellent taux de réussite.

Un nouveau lanceur, reprenant l'appellation Ariane 5, est décidé en 1985 et effectue son vol inaugural en 1996. Deux versions deviendront opérationnelles, elles se distinguent par l'étage supérieur ES (Ergols Stockables) ou ECA (Ergols Cryogéniques). À ce jour, Ariane 5 possède un taux de réussite remarquable, avec 77 lancements réussis d'affilée, et est considéré comme un leader mondial pour les lancements en GTO (Geostationary Transfer Orbit) ; la navette Hermès n'a pas vu le jour. Ariane 5 est un lanceur européen qui repose sur de nombreux acteurs : ESA (European Space Agency), CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, Centre Spatial Guyanais), Arianespace (commercialisation) et les industriels spécialisés comme Airbus Defence and Space, Safran, Europropulsion, Regulus, Eurocryospace,

La création récente d'ASL (Airbus Safran Launchers) a permis de rationaliser le paysage industriel européen des lanceurs, ASL devenant à la fois l'autorité de conception, le fabricant et le responsable de la commercialisation (74 % d'Arianespace). Les industriels européens intervenant dans Ariane 6 appartiennent à 12

pays, la participation de la France étant majoritaire (autour de 50 %).

2. POURQUOI ARIANE 6 ?

Un bilan des lancements spatiaux réalisés

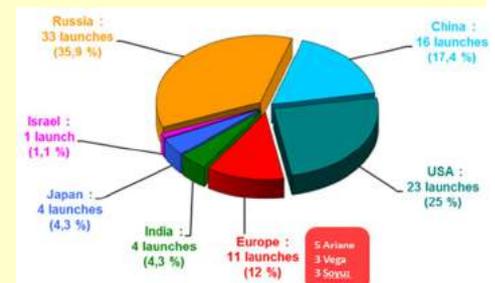


Fig. 1 - Lancements spatiaux 2015, toutes missions confondues.

en 2014 est donné sur la figure 1.

Les trois gros contributeurs sont la Russie, les États-Unis et la Chine. L'Europe arrive loin derrière avec 11 lancements : 5 Ariane 5, 3 Vega et 3 Soyuz. Dans un contexte très concurrentiel, on constate que les principaux concurrents disposent de marchés captifs qui sont les lancements institutionnels alors que l'Europe n'a fait qu'un lancement institutionnel et se bat sur le terrain des lancements commerciaux.

Un certain nombre de changements sont également à anticiper dans le domaine des lancements spatiaux. Ils sont résumés ci-dessous :

- il existe une explosion du nombre d'objets connectés, ce qui conduit à des projets de méga-constellations de satellites (constellations de plusieurs centaines de satellites) ;
- une nouvelle technologie arrive à maturité, la propulsion électrique pour le contrôle d'orbite et d'attitude des satellites ; la tendance passée pour les satellites de télécommunication était de s'alourdir d'environ 150 kg par an ; la propulsion électrique va permettre d'inverser cette tendance ;
- de nouveaux modes de financement vont déboucher sur une nouvelle dynamique ; des investisseurs privés

ARIANE 6, une nouvelle dynamique

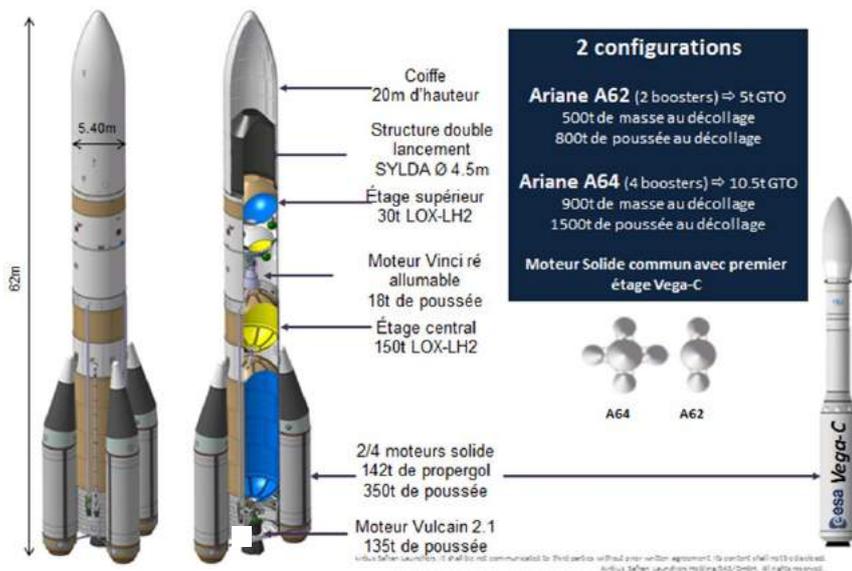


Fig. 2 – La configuration du lanceur Ariane 6.

Ariane A6 : Ariane 6 est un lanceur de moyenne à forte puissance (5 à 10,5 tonnes en orbite de transfert géostationnaire) développé par l'Agence spatiale européenne qui remplacera la fusée Ariane 5 vers 2021

Ariane A62 : 2 pour 2 boosters

Ariane A64 : 4 pour 4 boosters

investissent massivement dans le secteur spatial, par exemple Space X, Google, Planet Labs, de nouveaux entrepreneurs et start-ups apparaissent ;

- la concurrence actuelle s'exerce entre Ariane 5, Proton, Falcon 9, Atlas 5 et HII, elle va changer en opposant Ariane6 aux Falcon 9R et Falcon Heavy (Etats-Unis) , Angara A5 (Russie), NewGlenn et Vulcan (Etats-Unis), HIIII (Japon), LM5 et 7 (Chine) et GSLV MkIII (Inde) ;
- les lanceurs réutilisables sont une solution à la problématique « low cost » ; Space X et Blue Origin ont pris une certaine avance en réalisant un certain nombre de démonstrations réussies mais le gain économique pour

le lancement en orbite n'est pas encore clairement démontré.

Ariane 6 est clairement la réponse de l'Europe aux évolutions du marché des lancements spatiaux.

3. LA RÉPONSE DE L'EUROPE, ARIANE 6

La création d'ASL correspond à la volonté de rassembler les forces vives européennes qui possèdent des capacités exceptionnelles allant de la conception à l'intégration finale pour les lanceurs civils et militaires, les systèmes de propulsion solide ou liquide, les matières premières énergétiques, les structures et équipements spatiaux. ASL, c'est un chiffre d'affaires de 2,5 Md€ (estimation), 8000 salariés, 13 sites et 11 filiales. ASL a aussi une activité dans les produits dérivés et les services associés pour l'espace, l'aéronautique, le transport terrestre (airbags), les énergies renouvelables et les équipements industriels.

La configuration choisie pour Ariane 6 (figure 2) réutilise des moteurs existants (Vulcain 2.1, version simplifiée de Vulcain 2 qui vole sur Ariane 5) ou en développement (Vinci). Le seul moteur nouveau est le P120 (142 t de propergol solide), utilisé à deux exemplaires sur Ariane A62 (5 t en GTO) et à quatre exemplaires sur Ariane A64 (10,5 t en GTO), ce sera aussi le premier étage de Vega C. Le choix conservatif permet de viser un coût du lanceur autour de 70 M€, c'est-à-dire très inférieur à celui d'Ariane 5 et de limiter le temps et le budget de développement. La capacité de

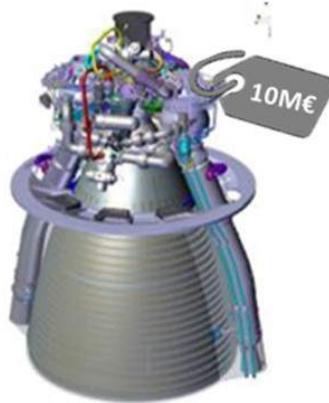


Illustration Ariane 6, © Airbus Safran Launchers

ARIANE 6, une nouvelle dynamique

Moteur Vulcain : le moteur Vulcain est un moteur-fusée cryogénique propulsant l'étage principal cryotechnique (EPC) du lanceur européen Ariane 5. Ce moteur assure près de 10 % de la poussée produite au décollage. Il est employé principalement après le largage des deux boosters latéraux (EAP ou P230) qui assurent près de 90 % de la poussée au décollage.

AUJOURD'HUI



Vulcain 2.1
LH2-LOX

FUTUR



Prometheus
LOX-méthane

Les différentes versions :

- Vulcain pour les versions génériques d'Ariane 5, Ariane 5G et 5G+ ;
- Vulcain 2 pour la version ECA d'Ariane 5, Ariane 5 ECA ;
- Vulcain 2.1 pour Ariane 6.

Illustration Ariane 6, © Airbus Safran Launchers



AIRBUS SAFRAN LAUNCHERS This document is the property of Airbus Safran Launchers. It shall be not communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed. Airbus Safran Launchers holding SAS/Orbital. All rights reserved.

Fig. 3 - Poursuite de la réduction du coût.

réallumage de Vinci, qui devra être démontrée lors des premiers lancements, est un élément essentiel pour le déploiement de constellations de satellites. Une multitude d'innovations technologiques, comme la production additive et le FSW, sont mises en œuvre pour la production.

4. AU-DELÀ D'ARIANE 6

La course à la réduction des coûts se poursuivra. L'Europe a commencé à travailler sur un futur moteur cryotechnique Prometheus utilisant le couple d'ergols liquides LOX-LCH4 (figure 3). L'objectif économique est très ambitieux.

À l'issue de la présentation d'Alain Charmeau, une discussion assez riche a eu lieu avec l'assistance. On ne retiendra ici que les questions les plus pertinentes. La première question a porté sur l'intérêt de la

réutilisation. L'orateur a rappelé qu'il n'existe pas de marché européen et que les sociétés comme OneWeb ont lancé un appel d'offre dans le monde entier. C'est donc la course à la constellation qui est essentielle et non le prix de lancement. Space X vise dans son « business plan » 50 lancements par an à partir de 4 pas de tirs et la production de 500 moteurs par an. À une question tentant d'opposer la démarche européenne, pour laquelle le développement est en grande partie financé par les états, et le développement des lanceurs Space X sous financement privé, l'orateur a rappelé que Space X a bénéficié d'un support financier important, sous forme de lancements pour la NASA et pour l'US Air Force (ndlr : même le moteur Merlin est issu de technologies gouvernementales). Il a été également rappelé que de plus en plus de satellites vont devenir électriques et qu'il subsiste une inconnue : verra-t-on se développer un marché pour des satellites de 150 à 500 kg en LEO mis sur orbite par un lanceur économique ?

Une conférence donc vivante et très réussie. PK



François Charritat, ingénieur de l'École Spéciale des Travaux Publics, du bâtiment et de l'industrie (ESTP), intègre Aéroports de Paris en 1983, après deux années d'expatriation au Maroc. Il y exerce de nombreuses fonctions dont responsable du service maintenance puis chef du département exploitation de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle. Successivement directeur des opérations de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle de 2003 à 2006 puis directeur de l'aéroport de Paris-Le Bourget de 2012 à 2015, il est aujourd'hui directeur délégué aux relations territoriales nord.

Après une formation d'ingénieur des travaux publics, François Charritat a occupé de nombreux postes dans le groupe ADP dans la maintenance, l'exploitation, les ressources humaines et la qualité. Il a été directeur de l'aéroport du Bourget, il est secrétaire général de l'association de l'aviation d'affaires et de celle des aéroports francophones.

C'est donc un professionnel possédant une grande expérience qui nous a fait partager sa vision de l'aéroport moderne. Un aéroport n'est pas un aérodrome où les avions se contentent d'atterrir et de décoller, c'est un lieu vivant et un carrefour du monde avec un rôle social fort. Les grandes caractéristiques du transport aérien mondial sont récapitulées sur la figure 1. En outre, les aéroports franciliens Roissy/Charles de Gaulle et Orly participent fortement à l'aménagement du territoire car leurs implantations sont partagées entre plusieurs départements.

La présentation a été décomposée en trois parties.

- Qu'est-ce qu'un aéroport ?
- Quelles sont les menaces et les contraintes que rencontre un aéroport ?
- Quelles sont les opportunités offertes aux aéroports franciliens ?

1. UN AÉROPORT EST BEAUCOUP PLUS QU'UN AÉRODROME

Un aérodrome est, selon la définition adoptée en 1906, un terrain aménagé

pour le décollage et l'atterrissage d'aéronefs. Un aéroport comporte évidemment des pistes mais sa fonction première est de gérer le départ et l'arrivée de passagers. Voici quelques chiffres pour l'année 2016 permettant de se rendre compte des flux à gérer :

- Roissy/CDG : 65 millions de passagers, soit environ 180 000 par jour et 10 000 par heure, 480 000 mouvements d'avions ;
- Orly : 31 millions de passagers, 250 000 mouvements.

Physiquement, l'aéroport proprement dit, c'est beaucoup d'espace vide (2 000 ha de pelouses à Roissy pour une superficie totale de 3 500 ha), beaucoup de clôtures pour la sécurité et une réelle biodiversité pour la faune. L'aéroport est aussi la superposition de trois zones : une zone côté ville et une zone côté pistes auxquelles se superpose une zone internationale. La salle d'embarquement est un bon exemple de cette complexité et un défi lancé aux architectes : comment être hermétique pour garantir la sûreté et prêt à s'ouvrir pour faciliter une évacuation ?

Un aéroport joue un rôle économique important dans le territoire qu'il occupe, en raison des emplois qu'il génère. Les emplois directs pour Roissy par exemple, sont au nombre d'environ 85 000 ETP et concernent une foule de métiers : compagnies aériennes, trafics air et sol, sécurité, douanes, transports au sol, restauration, réparation et maintenance... Ces emplois induisent des lieux de résidence des personnels impliqués, qui sont préférentiellement, pour Roissy, la Seine et Marne et l'Oise, selon l'association R'Pro'Mobilité qui regroupe les principales entreprises autour du Plan local de Déplacements Inter-entreprises.

L'aéroport a donc un fort impact sur la vie économique locale et participe à son développement. Il convient donc de penser au-delà de l'aéroport. C'est ce que représente le concept d'aire aéroportuaire comprenant la ville aéroportuaire propre-



Fig. 1 - Le transport aérien mondial.

Les aéroports franciliens, le temps de la maturité

THE AIRPORT AREA, A KEY DRIVER OF THE REGIONAL ECONOMIC DEVELOPMENT

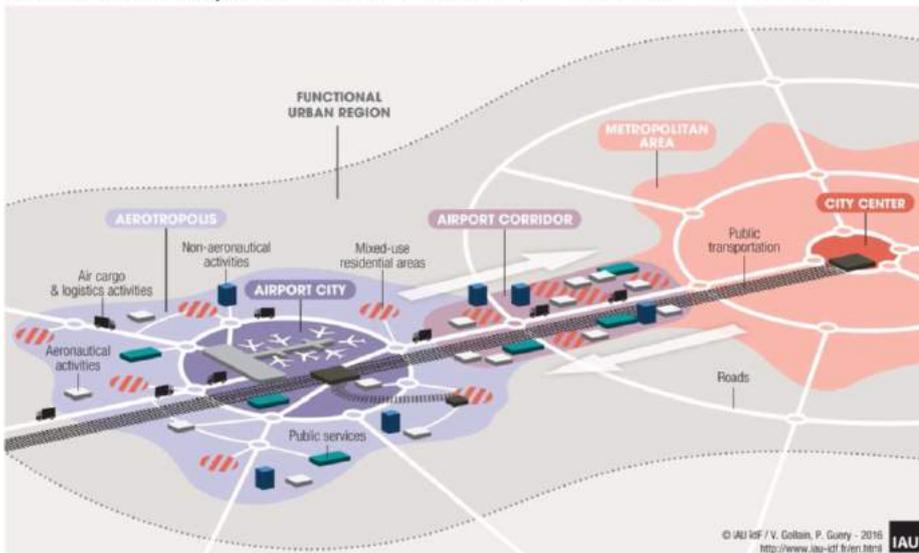


Fig. 2 - Le concept d'aire aéroportuaire.

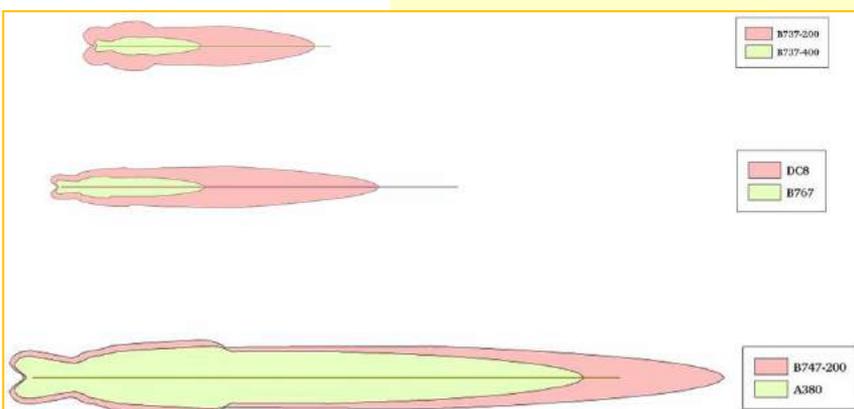
ment dite, un corridor et les centres-villes classiques à proximité. Une aire aéroportuaire rassemble donc :

- un lieu d'activités professionnelles et d'affaires ;
- un lieu d'humanité satisfaisant l'un de ses besoins fondamentaux, la mobilité ;
- un lieu de développement durable.

2. MENACES ET CONTRAINTES AUXQUELLES SONT CONFRONTÉS LES AÉROPORTS

Le développement des aéroports se heurte souvent à des obstacles donnant lieu à des discussions difficiles entre les tenants du pour et du contre. L'opposition vient souvent des riverains (« no airport in Wilton », troisième piste d'Heathrow, ...) qui redoutent l'accroissement des gênes résultant d'un trafic en augmentation ou qui adoptent pour certains des attitudes idéologiques (cas de Notre-Dame-des-Landes). Finalement, beaucoup ne voient que les inconvénients ou adoptent des attitudes non rationnelles, en oubliant que les aéroports représentent bien sou-

Fig. 3 - Évolution du bruit à la source (iso contours dB) entre 1955 et 2015.



vent un réel gisement de croissance économique (cas de l'Île-de-France).

D'autres facteurs interviennent :

- des choix douteux ont été faits par le passé par des collectivités locales (en Espagne, Dijon vs Dole, Lorient vs Rennes, Deauville vs Caen, ...);
- des concurrences déloyales existent entre les pays : les statuts sont différents selon les pays (46 % des aéroports mondiaux sont privatisés ; en France, la part de l'État dans ADP n'est plus que de 50,2%), des aéroports sont ultra-subsidés (Dubai, Turquie), la réglementation n'est évidemment pas la même selon les pays et elle est changeante (impact de la COP21).

En ce qui concerne Nantes-Atlantique, le circuit préférentiel d'approche conduit les avions à survoler le centre-ville de Nantes à basse altitude. Si le trafic continue à croître, la gêne des habitants va augmenter, ce qui conduira inexorablement à fermer l'aéroport existant. Dans cette perspective, la solution Notre-Dame-des-Landes n'est pas forcément mauvaise, dans la mesure où elle répond à des objectifs de sécurité aérienne et de préservation de la santé des riverains.

Les contraintes environnementales jouent un rôle important et, en premier lieu, ce qui est le plus sensible, le bruit. Une comparaison de la population européenne exposée à un bruit supérieur à 55 dB démontre que le bruit généré par les véhicules terrestres (routes, rails) est de loin très supérieur à celui des aéroports. En outre, des progrès significatifs ont été réalisés sur le bruit à la source, grâce notamment à l'augmentation du taux de dilution des moteurs (figure 3) et à l'optimisation des procédures (cas de Boston). Un objectif à long terme est de confiner le bruit à 65 dB dans le périmètre de l'aéroport.

3. OPPORTUNITÉS OFFERTES AUX AÉROPORTS FRANCILIENS

La liberté de déplacement est maintenant considérée comme un droit fondamental pour tout citoyen. Le transport aérien participe à ce besoin de mobilité et dé-

Les aéroports franciliens, le temps de la maturité

-montre une croissance continue des dernières années : en 2014, il représentait 6 100 milliards de RPK (Revenu Passenger Kilometre) et une évolution de 5,8 % par rapport à 2013... D'un point de vue économique, l'activité aéroportuaire correspond au 21ème secteur économique dans le classement PIB, avec un apport de 2,7 milliards de \$ (3,4 % du PIB), et à 63 millions d'emplois dans le monde. Sur le plan sociologique, il constitue un vecteur de rapprochement et de cohésion sociale.

La réduction des impacts environnementaux est une priorité des aéroports, notamment en ce qui concerne l'impact sonore qui est très surveillé en France par l'ACNUSA (Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires). En ce qui concerne la question des émissions gazeuses, ADP fait siens les objectifs définis par l'OACI et supportés par l'ATAG. Pour le développement durable, Orly a mis en service une installation de chauffage par géothermie et CDG produit 25% de son chauffage par la biomasse. Déplacer les aéroports vers des lieux de faible densité carbone n'est pas une solution idéale (exemples de l'aéroport de Narita à 60 km de Tokyo et de Mirabel/Montréal) dans la mesure où elle induit des problèmes économiques nouveaux. En fait, les aéroports sont difficilement délocalisables. L'Ile-de-France a besoin de ses aéroports. Le premier aéroport francilien a été Le Bourget, créé à Dugny en 1914 par le Général Galliéni ; cet aéroport a eu longtemps une excellente réputation mondiale et c'est au Bourget qu'a atterri Charles Lindbergh en 1927. Le Bourget est aujourd'hui spécialisé dans l'aviation d'affaires et il est devenu le champion d'Europe de sa catégorie.

Les aéroports partagent les objectifs généraux de l'aviation commerciale pour ce qui concerne l'amélioration de l'efficacité carburant liée aux progrès technologiques des avions, la stabilisation à partir de 2020 des émissions de CO₂ (« carbon neutral growth ») puis leur diminution à l'horizon 2050. Pour ce qui concerne les aéroports franciliens, des progrès sont attendus dans la gestion du trafic, ce qui per-

mettrait à Roissy d'accueillir 150 millions de passagers par an sans augmentation correspondante du nombre des mouvements, dans les infrastructures de transport terrestre (projet du Grand Paris Express et du CDG Express : 2024) et dans une gouvernance renouvelée.

Une dizaine de questions ont été posées à François Charritat à l'issue de sa présentation. Les plus intéressantes sont données ci-dessous.

- Certaines compagnies aériennes et la FNAM (Fédération Nationale de l'Aviation Marchande) se plaignent de l'augmentation continue des taxes et redevances aéroportuaires, ce qui engendrerait un biais de concurrence vis-à-vis d'aéroports étrangers. François Charritat a répondu que cette augmentation est bien encadrée par l'État français.
- Les aéroports franciliens ne sont pas assez « aimables » : la signalétique n'est pas encore parfaite, l'environnement dans la zone bagage est pauvre. L'orateur reconnaît que la signalétique de Roissy est compliquée mais que des efforts sont faits pour l'améliorer (terminal 2E et ses salles d'embarquement K, L et M). Le métier d'aéroport est aussi un métier de commerce et d'hospitalité, ce qui implique des efforts continus de progrès.
- Peut-on penser à des aéroports spécialisés dans le fret ? François Charritat mentionne un projet du côté de Pithiviers, selon lui il s'agirait d'un investissement lourd à la rentabilité douteuse. En fait, les compagnies aériennes ont tendance à se séparer des avions cargos, du fait que 60 % du fret vole aujourd'hui dans les avions passagers.

À l'issue de cette présentation qui a permis de mieux connaître les aéroports franciliens, leur mode de fonctionnement et leur potentiel de développement économique, il faut constater que la capitale française peut s'enorgueillir d'un système vivant et évolutif.

Franciliens, aimons nos aéroports ! **PK**



Aéroport de Roissy Charles-de-Gaulle par Citizen59 via Wikimedia Commons

nEUROn, démonstrateur européen de technologies pour drone de combat furtif par Thierry Prunier¹

Académie de l'Air et de l'Espace (AAE)

Mardi 25 Avril 2017 de 18h30 à 20h00

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris

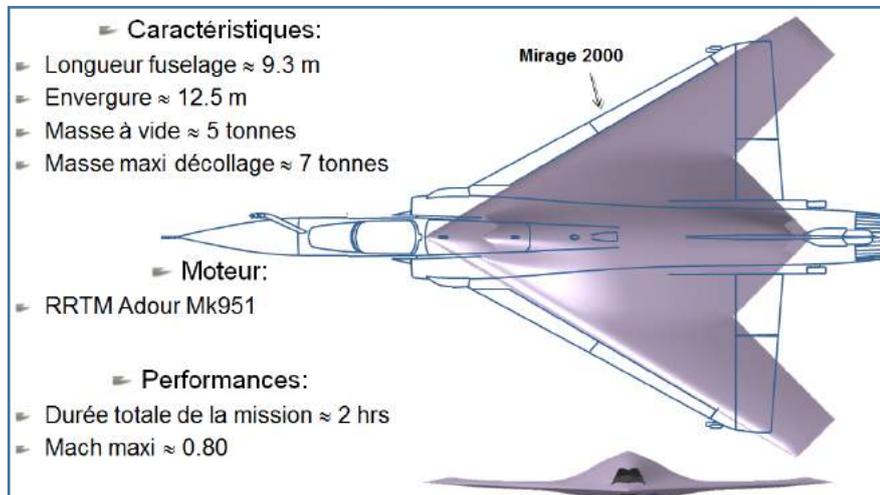


Fig. 1 - L'avion nEUROn comparé au Mirage 2000.

1. Thierry Prunier rejoint l'entreprise Dassault en 1971 et collabore aux programmes Mirage 4000, European Fighter Aircraft et Rafale. Directeur de cabinet de Serge Dassault en 1990, il devient directeur du programme Hermès, directeur du marketing technico-opérationnel des avions d'armes pour l'exportation, directeur des programmes de systèmes d'avions non habités puis du programme nEUROn. Il est vice-président de l'AAE et président du Tomato.

2. HAI pour Hellenic Aerospace Industry. Principale compagnie aérospatiale de la Grèce créée en 1975.

3. RUAG ; entreprise internationale travaillant dans les domaines de l'aérospatial et de la défense. Créée en janvier 1999, la confédération Suisse en est l'actionnaire unique.

Thierry Prunier est un ingénieur Sup-Aéro qui a fait toute sa carrière chez Dassault-Aviation, où il a travaillé sur Hermès, le Rafale et qui a eu, à la fin de sa vie professionnelle, la responsabilité du programme nEUROn. Le drone nEUROn ayant déjà fait l'objet de conférences, Thierry Prunier a concentré sa présentation sur les démonstrations réalisées ces dernières années.

Dans une première partie, un rappel a été fait du programme nEUROn, de ses objectifs et de ses caractéristiques. nEUROn est un projet de l'industrie européenne de défense visant le développement d'un savoir-faire stratégique relatif aux technologies de furtivité et d'autonomie. Le nEUROn n'est ni un prototype, ni même un démonstrateur mais un démonstrateur de technologies pour UCAV (Unmanned Combat Air Vehicle). Le programme a été mené sous la tutelle de la DGA française ; Dassault-Aviation a été le « prime contractor » et sept industriels européens ont été partenaires : EADS-Casa (Espagne), Saab (Suède), Thales (France), Alenia (Italie), HAI² (Grèce) et RUAG³ (Suisse). nEUROn ne se limite pas à un avion, il comprend une station-sol, où sont regroupés les moyens de contrôle à distance, et des liaisons de données entre le sol et l'avion. Le système implique aussi le contrôle aérien et une salle d'écoute, il utilise pour sa localisation le GPS/EGNOS.

L'avion nEUROn possède la taille d'un avion de combat de type Mirage 2000 (figure 1).

La furtivité est l'un des objectifs essentiels du programme nEUROn. La furtivité électromagnétique a été recherchée dans un large domaine de fréquence, depuis la bande VHF jusqu'aux bandes X à Ka, ce qui correspond à la panoplie des systèmes de détection radar. Cette furtivité a été mesurée sur l'avion réel dans la chambre anéchoïque SOLANGE (Système Orientable Lourde pour AéroNefs et Gros Engins) de la DGA/MI près de Rennes. Le résultat obtenu est à la hauteur de l'objectif : la SER est de 100 à 1000 fois inférieure à celle d'un avion classique, ce qui correspond à peu près à une distance de détection divisée par quatre (pour la SER divisée par 1000) ; l'avion nEUROn est aussi furtif qu'un moineau ! La furtivité électromagnétique est obtenue par une forme adaptée, l'intégration du moteur, des matériaux spécifiques et le traitement des moindres détails. Le résultat est une aile volante sans dérive, sans antenne extérieure et sans radar, possédant une entrée d'air au-dessus de l'avion et une tuyère aplatie. L'avion est conçu pour le largage d'armements depuis une soute (pas d'emport extérieur). Ces spécifications induisent des exigences ambitieuses pour le contrôle en vol : contrôle sans dérive et anémométrie pariétale. La discrétion infrarouge a aussi été prise en compte.

Le largage d'armement depuis une soute pose une difficulté particulière. À l'ouverture de la porte de la soute, la soute est l'objet de vibrations aéroacoustiques intenses (jusqu'à 160 dB), dont la modélisation complexe a été correctement restituée au cours des vols.

La réalisation de vols autonomes pose en outre des exigences dans le domaine réglementaire. Les normes à respecter sont adaptées de celles de la certification civile JAR23. Il faut démontrer une très faible

nEUROn, démonstrateur européen de technologies pour drone de combat furtif

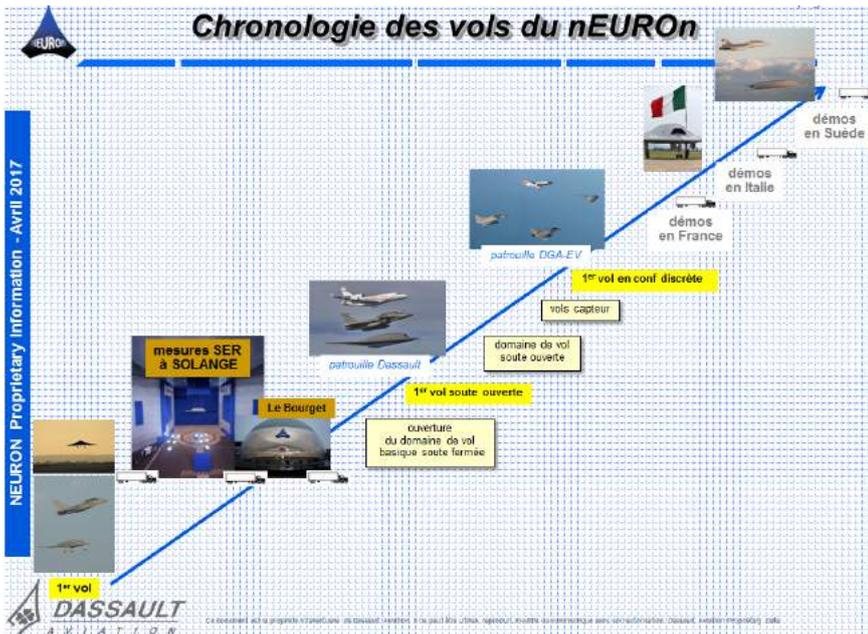


Fig. 2 - Les essais en vol du nEUROn.

probabilité de défaillance conduisant à un crash incontrôlé, une faible probabilité de sortir de la zone d'essais et, si le crash ne peut être évité, qu'il se produira dans une zone non peuplée.

Les essais et démonstrations ont eu lieu au cours des 115 à 120 vols réalisés depuis le 1er décembre 2012. La chronologie des vols du nEUROn est donnée sur la figure 2. Ils ont eu pour objectifs d'obtenir le permis de vol, de mesurer les signatures électromagnétique et infrarouge, de tirer un armement, de détecter et reconnaître une cible. Les essais en vol se sont étalés sur trois ans.

Fig. 3 - Les patrouilles Dassault (4 juin 2016).



Le développement a été réalisé en France en 2013 et 2014, les vols de démonstrations ont eu lieu en France, en Italie et en Suède. La calibration de l'anémométrie pariétale a été une priorité : l'avion a d'abord volé avec une perche anémométrique, la base aérodynamique a été mise à jour et les algorithmes ont été optimisés. L'ouverture du domaine de vol a été progressive et les premiers vols ont été réalisés avec la soute à armement fermée. Un des derniers vols en Suède a vu le tir d'un armement après ouverture de la porte de la soute.

En France, certains vols spécifiques ont constitué une première mondiale, comme les vols en patrouille Dassault (nEUROn, Rafale, Falcon 7X) et DGA/EV (nEUROn, Rafale, Mirage 2000, Falcon), témoignant d'une grande confiance dans la fiabilité du système (figure 3).

Un survol du porte-avions Charles de Gaulle a aussi été réalisé, l'environnement électromagnétique proche d'un porte-avions étant particulier. Le scénario d'attaque d'une cible a été validé en Italie, la confrontation avec des systèmes sol-air a été faite en Suède. Des démonstrations complémentaires en vol ont eu lieu en 2016 (le nEUROn face à l'Hawkeye et au système sol-air Aster).

Le bilan du programme nEUROn peut s'établir comme suit. Tous les objectifs, véritables défis industriels et techniques, ont été atteints : furtivité, vol autonome,

nEUROn, démonstrateur européen de technologies pour drone de combat furtif

4. X45 : démonstrateur technologique construit par la société Boeing pour mettre au point une prochaine génération de drones de combat. Le projet a été arrêté le 2 mars 2006.



Wikimedia Commons

5. Pierre Pascallon, universitaire et homme politique français, spécialiste des questions de défense et auteur de plusieurs ouvrages.

tir d'armement, détection et reconnaissance d'une cible. La coopération entre partenaires a été exemplaire et a constitué une aventure humaine réussie.

La suite du nEUROn s'inscrit pour la France dans le cadre de la coopération franco-britannique FCAS (Future Combat Air System). Un aéronef opérationnel n'est pas envisagé avant 2030. Il s'agira probablement d'un appareil d'environ 20 tonnes, avec une aile à double flèche (à l'image du Boeing X45B⁴), équipé d'un moteur qui pourrait être dérivé du M88, possédant la capacité de délivrer des armes guidées et étant compatible avec un porte-avions.

Les questions ont été nombreuses à l'issue de la présentation fort vivante de Thierry Prunier. Les plus pertinentes ont été les suivantes.

- **Comment se situe le nEUROn par rapport aux travaux étrangers ?** Les États-Unis ont développé les Boeing X45A, B/C, N et Northrop-Grumman X47 et ont une certaine aisance dans la mise en œuvre opérationnelle. La Grande-Bretagne a fait voler le Taranis et il semble que la furtivité électromagnétique du Taranis et du nEUROn soient comparables (ndr : il existe un projet russe, le Mikoyan Skat, dont on ne connaît pratiquement rien).
- **Quel a été le coût du programme nEUROn ?** Les dépenses globales ont

été de l'ordre de 50 M€/an pendant dix ans. Quant au développement d'un prototype FCAS, il serait d'environ 3 à 4 Md€. Le coût de production d'un UCAV ne devrait pas être beaucoup plus élevé que celui d'un avion de combat conventionnel.

- **Quels sont les risques de piratage informatique ?** Ces risques existent, il faudra des liaisons cryptées et des systèmes redondants.

Donc une présentation remarquable sur un programme innovant ayant atteint tous ses objectifs. **PK**

OUVRAGES

Demain les drones de combat ? Sous la direction de Pierre Pascallon⁵, 198 pages, juillet 2004, ISBN 2-7475-6692-7, .

Espace et défense, sous la direction Pierre Pascallon et Stéphane Dossé Défense, 262 pages, janvier 2011, ISBN 978-2-296-56790-0.



Fig. 4 - Le système de combat aérien futur, crédit Tiraden via Wikimedia Commons

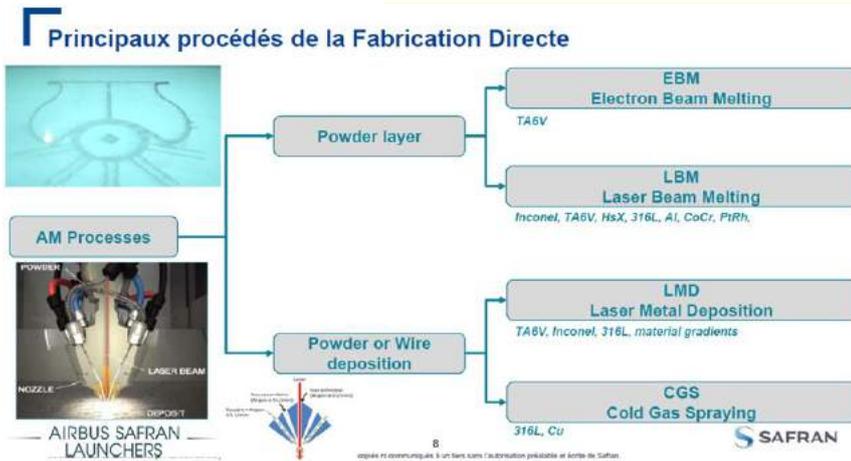


Fig. 1 - Principaux procédés de Fabrication Directe.

1. **ALM** : Additive Layer Manufacturing.
2. **EBM** : Electron Beam Melting.
3. **LBM** : Laser Beam Melting.
4. **LMD** : Laser Metal Deposition.
5. **CGS** : Cold Gas Spraying.
6. **TRL** : Technology Readiness Level.
7. **MRL** : Manufacturing Readiness Level.

La fabrication additive (ALM¹) popularisée sous le nom d'imprimante 3D, est bien une méthode de fabrication directe puisqu'elle évite en grande partie l'enlèvement de matière par usinage. Après avoir rappelé la place centrale occupée par le groupe Safran & ArianeGroup dans la conception et la fabrication de moteurs destinés aux secteurs aéronautique et spatial, les deux intervenants ont rappelé les différentes technologies de fabrication directe et présenté un échantillonnage des pièces réalisées pour différents moteurs. Cette présentation très technique a permis de prendre conscience des progrès déjà réalisés et des efforts restant à consentir pour faire passer les technologies du stade des démonstrations à la production industrielle.

Il existe différents procédés illustrés par la figure 1. Ces procédés se distinguent par la chronologie et la nature du dépôt et par la source de chaleur permettant la fusion de la matière déposée ; ces procédés sont en outre adaptés à différents types de matériau, dont les principaux, dans le domaine abordé, sont les alliages de titane et les bases nickel comme les inconels. Il y a donc quatre procédés principaux : l'EBM², le LBM³, le LMD⁴ et le CGS⁵.

L'intérêt potentiel de la fabrication directe pour la propulsion tient aux avan-

tages suivants :

- réduction du cycle de production, d'énergie et de matière brute ;
- possibilité de limiter les assemblages et de réaliser des pièces plus complexes (cas particulier des échangeurs thermiques), ce qui peut se traduire par un gain de masse ;
- solutions innovantes de réparation, ce qui est important pour des moteurs anciens en évitant d'avoir à recréer des outillages spécifiques coûteux comme des moules de fonderie ;
- réduction du nombre de pièces d'un organe ;
- à terme, mise en œuvre d'un cycle optimisé de développement.

La logique de qualification/certification suit un chemin standard de développement de matériaux et procédés. On connaît l'échelle de 1 à 9 appelée TRL⁶, allant de la R&D à la production industrielle. Une autre échelle allant de 1 à 10, nommée MRL⁶, a été introduite. À la suite de la certification, la qualité de la production doit être impérativement maîtrisée en suivant les règles des procédés spéciaux, ce qui implique la démonstration que les pièces produites sont conformes à la définition et que leurs caractéristiques sont sans variation en dehors des limites considérées comme acceptables.

Safran Aircraft Engines a commencé ses travaux sur la fabrication directe en 2000, en utilisant une machine EOS à partir de 2008. D'autres entités du groupe Safran comme Safran Helicopter Engines se sont investies un peu plus tard sur le sujet. Les travaux en LBM se sont déroulés de 2014 à 2016 et, durant cette période (figure 2), des essais au banc pour le LEAP et pour le Silvercrest ont été réalisés. Pour le redresseur Silvercrest, un point important a été mis en évidence : l'intégration de la fin de gamme de la pièce dans la conception est la clé du coût. Si la fabrication additive a connu des améliorations (réduction du temps de fusion et

Application de la fabrication additive à la propulsion

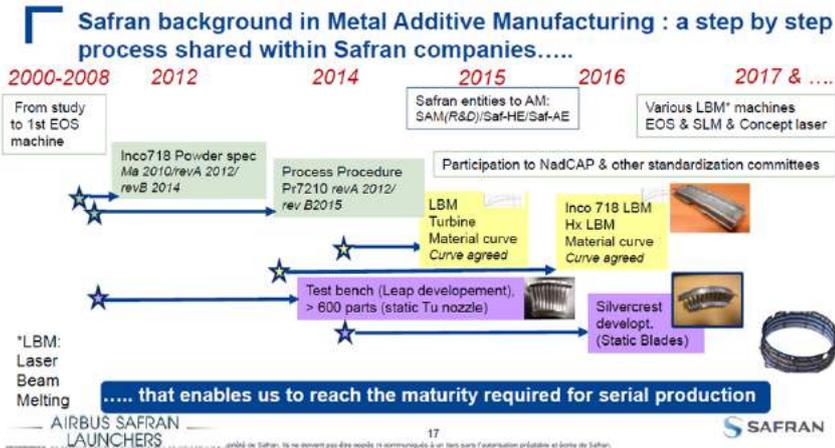


Fig. 2 - Chronologie des développements Safran en fabrication additive

du temps de fraisage), il subsiste un challenge lié à la réalisation de l'état de surface souhaité, actuellement fait par usinage ou polissage.

Au-delà de la mise au point de procédés et de démonstrations portant sur des pièces de moteur, Safran Aircraft Engines a beaucoup investi sur les méthodes d'estimation des coûts et sur l'intégration de la fabrication additive dans des gammes complètes de fabrication. Le démarrage de la production de pièces opérationnelles est donc proche. L'étape suivante portera sur la conception et la production de pièces spécifiquement adaptées à la fabrication additive.

L'investissement d'ArianeGroup, au travers du cluster Propulsion Liquide, obéit aux mêmes objectifs que ceux de Safran Aircraft Engines, même si les volumes de production envisagés seront plus modérés. On connaît l'incidence déterminante de la masse sur les performances des lanceurs spatiaux. La fabrication additive est susceptible d'introduire de nouveaux degrés de liberté par rapport aux procédés traditionnels et de participer à l'allègement, d'autoriser de nouvelles fonctions

et de limiter les assemblages, de limiter la consommation de matériau brut,.... L'approche est faite pas-à-pas : d'abord à isodesign, en remplacement de procédés conventionnels comme la fonderie, puis en adaptant les formes en optimisant la topologie (en s'appuyant dans certains cas sur le biomimétisme) et à terme en adoptant de nouvelles architectures. Il va sans dire que tous les travaux doivent trouver leur application sur le futur lanceur européen Ariane 6 en cours de développement.

Trois exemples de travaux conduits par ASL ont été présentés (figure 3) :

- réalisation de la croix de cardan du moteur Vulcain 2.1 ; la résistance mécanique a été augmentée de 70% avec un gain de coût minime ; les cylindres sur la figure correspondante sont des éprouvettes ;
- réalisation de la tête d'injection du moteur Vulcain 2.1 ; traditionnellement la tête d'injection d'un moteur à ergols liquides est constituée d'un grand nombre d'injecteurs élémentaires assemblés ; le passage à la fabrication additive a permis de réduire ce nombre, d'améliorer les circuits hydrauliques et de réduire significativement le coût ; cette nouvelle tête d'injection a fait l'objet d'un essai réussi sur le générateur de gaz du moteur Vulcain V 2.1 ;
- « auxiliary power unit gas generator ». Ariane 6 innove en remplaçant la pressurisation par gaz par la production à bord de gaz chauds via des générateurs de gaz ; cette technologie nécessite des échangeurs thermiques dont la réalisation n'est possible qu'avec la fabrication additive.



Fig. 3 - Réalisations d'Ariane Group par fabrication directe pour ensembles propulsifs

Application de la fabrication additive à la propulsion



Les deux présentations ont été convaincantes. La fabrication directe permet d'ores et déjà de fabriquer des pièces qui voleront bientôt (LEAP, Silvercrest, Vulcain 2.1). Il reste à préciser les estimations de coût, à fiabiliser l'approvisionnement des poudres, à rendre les procédés plus robustes, à augmenter la taille et la productivité des machines et à concevoir ALM¹.

Les principales questions de l'assistance ont porté pour l'essentiel sur les points suivants :

- les caractéristiques du matériau brut ; au moins dix paramètres doivent faire l'objet d'une surveillance et chaque lot de poudre doit être vérifié ;
- la production de poudre et les fabricants de machine ; les principaux fabricants de poudre sont américains et allemands ; il existe un projet Aubert et Duval ; pour les machines, les constructeurs sont américains, chinois, allemands et suédois ; Michelin a un projet de machine ; la taille limite des machines dépend du procédé, la notion de taille étant moins critique pour le LMD ; une réflexion est lancée sur la réalisation d'une chambre de combustion d'un mètre cinquante environ ; la maîtrise des déformations

pour les grandes pièces est à améliorer ;

- réparations ; il s'agit d'une question difficile en raison des matériaux très variés rencontrés.

À la fois didactique, précise et bien illustrée, la présentation d'Anne Thenaisie et de Frédéric Lalthier a parfaitement démontré la capacité du groupe Safran et d'ArianeGroup à faire évoluer les procédés de fabrication vers une production industrielle.

PK



LA COMMISSION PROPULSION DE 3AF

La propulsion est reconnue comme une **technologie critique** par tous les pays dans la mesure où elle conditionne la mobilité et les performances des systèmes aéronautiques et spatiaux. Comme l'ensemble des Commissions de la 3AF, la Commission Propulsion s'intéresse aux deux piliers de l'activité aérospatiale : l'aéronautique et le spatial qu'ils soient civils ou militaires.

Dans cette perspective, elle porte une attention toute particulière aux moteurs suivants : - Aérobies : turboréacteur, turbopropulseur, turbomoteur, statoréacteur et super statoréacteur, moteurs à onde de détonation ; - Anaérobies : moteur-fusée à propergol solide, à ergol liquide et hybrides, propulseurs spatiaux électriques. Le périmètre de la Commission Propulsion couvre la totalité des technologies, moyens de conception, aspects opérationnels, moyens d'essai et instrumentations des systèmes propulsifs. La vocation est de promouvoir la recherche, le développement et l'implémentation de concepts améliorés ou nouveaux et des solutions technologiques qui leurs sont associées, en assurant un lien actif entre les mondes académique, de la recherche finalisée et de l'industrie.

Conférences du soir : environ quatre à cinq par an, traitent d'un sujet particulier de propulsion, parfois organisées de façon conjointe avec d'autres commissions techniques.

Président : Michel DESAULTY, SAFRAN-SNECMA, Ingénieur en Chef R & T

Simulation terrestre de séjours martiens

Par Lucie Poulet¹ et Cyprien Verseux²

Mardi 4 Juillet 2017 de 18h30 à 20h00

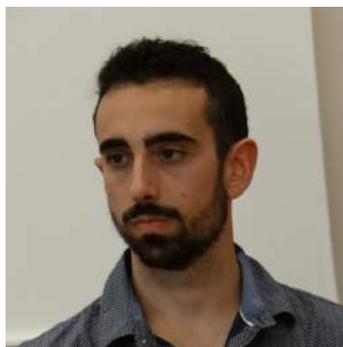
Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris



Sur l'île d'Hawaii, du dôme vers le panneau solaire, crédit Christiane Heinicke.



1. Lucie Poulet, ingénieure et doctorante en Génie des Procédés à l'Institut Pascal de Clermont Ferrand.



2. Cyprien Verseux, astrobiologiste et doctorant en Biologie Moléculaire et Cellulaire à l'Université de Rome II.

Des expériences de simulation terrestre pour des séjours Martiens se tiennent régulièrement à 2500 mètres d'altitude sur les flancs du volcan Mauna Loa sur l'île d'Hawaii située dans l'océan Pacifique. Le site, isolé, abiotique et de couleur rougeâtre, rappelle les paysages martiens. Ces expériences complètent les résultats de la mission Mars 500³ conduite en Russie dans la banlieue de Moscou le 3 juin 2010.

Passionnés et sélectionnés pour leurs capacités à gérer la promiscuité en espace confiné, au fait des techniques de résolution de conflits, Lucie Poulet et Cyprien Verseux, équipiers de deux des missions HI-SEAS⁴, ont vécu isolés sur les pentes du volcan dans un dôme de onze mètres de diamètre pendant des mois (resp. 4 et 12 mois).

Au cours de ces missions financées par la NASA en vue de préparer les futures missions habitées vers Mars, aucun contact direct avec l'extérieur n'était possible et les communications avec l'extérieur, réduites à de seuls emails, étaient retardées de 2 fois 20 minutes pour simuler les durées de transfert d'informations entre la Terre et Mars. Au milieu d'une région désertique, l'électricité générée par des panneaux solaires était comptée ; ils vivaient

avec peu d'eau (4000 litres d'eau pour 6 personnes et 3 à 6 semaines), devaient limiter à 2 le nombre de douches hebdomadaires de 30 secondes, se nourrissaient d'aliments lyophilisés en quantités limitées et les sorties hors du dôme ne s'effectuaient qu'équipés de lourdes combinaisons. Toutes les conditions d'un séjour Martien étaient reproduites à l'exception de la gravité qui ne pouvait être représentative ($g_{Mars} = 0,38 g_{Terre}$). Les participants ne disposaient d'aucune pièce de rechange et devaient gérer la pénurie en eau, aliments et énergie. Toutes les journées étaient dédiées à la maintenance des équipements, à la recherche scientifique et/ou à la communication vers les écoles et le grand public.

Lucie, Cyprien et tous les autres étaient à la fois cobayes et scientifiques. En tant que cobaye, chaque membre d'équipage devait se livrer à divers travaux, exercices et questionnaires destinés à étudier les effets de l'isolement et du confinement sur la psychologie, la cohésion et les performances d'un équipage isolé. En tant que scientifiques, ils effectuaient des travaux d'étude ou de recherche dans différents domaines scientifiques ou techniques comme l'impression 3D, l'intervention chirurgicale à distance, la culture en espace confiné ou l'expérimentation de techniques capables d'extraire l'eau du sol martien.

Une journée type commençait par un lever vers 7 heures. Les petits déjeuners étaient pris séparément et chacun déjeunait généralement en travaillant. Suivaient ensuite des questionnaires (8 questionnaires/jour) à remplir pour les études sociales et médicales puis les sorties extravéhiculaires. Des échantillons biologiques pouvaient également être prélevés

3. Mars 500 : six hommes sont restés enfermés durant 520 jours pour simuler un trajet aller-retour de la Terre à Mars.

4. HI-SEAS : Hawaii Space Exploration Analog and Simulation, programme de missions scientifiques de l'Université d'Hawaii.

Simulation terrestre de séjours martiens



Anne Caraccio et Lucie Poulet lors des mesures de résistance du sol. Crédit Ross Lockwood.

pour analyser les effets du confinement sur le niveau de stress. Ces prélèvements pouvaient également être utilisés pour identifier l'apparition de pathologies ou de déficiences nutritionnelles.

Pour les sorties, la partie du groupe qui restait à l'intérieur du dôme aidait l'autre partie à enfiler et régler les combinaisons.

Toutes les sorties s'effectuaient en assurant un contact radio entre l'extérieur et l'intérieur du dôme ; le langage des signes pouvait être utilisé en cas de panne radio. Les sorties s'effectuaient sur le champ de coulée volcanique ou à l'intérieur des tunnels de lave sur des distances allant jusqu'à 2 kilomètres autour du dôme. Chaque sortie donnait lieu à des relevés et analyses géologiques et/ou atmosphériques.

Après les déjeuners, suivaient les travaux en laboratoires séquencés par une ou plusieurs activités sportives (tapis de course, musculation...) ou intellectuelles (apprentissage du russe, du morse...). La journée se terminait par un diner pris en commun avec musique... suivi de nouveau par une séance de réponses à des questionnaires (sociologiques & médicaux) puis par l'écriture d'articles pour la recherche ou la communication.

Devant l'impossibilité d'emporter le ravitaillement nécessaire à la durée des missions habitées sur Mars, les équipages devront produire les denrées nécessaires à leur survie en recyclant les consommables qui auront été emportés, tels que

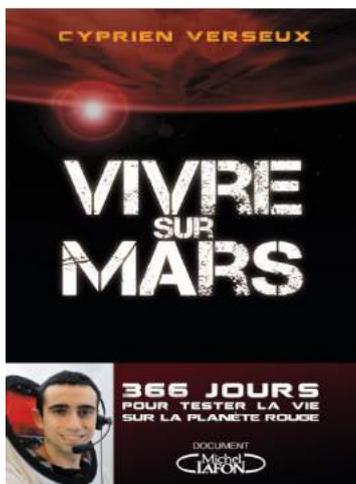
Les conséquences du voyage – Les connaissances acquises depuis le début de l'ère spatiale montrent que l'absence prolongée de pesanteur a des conséquences importantes sur le fonctionnement et les capacités du corps humain. Ainsi, le champ visuel, l'acuité visuelle, la densité osseuse (1 à 2% par mois), le volume et le tonus musculaire diminuent ; le vieillissement des artères s'accélère (20 à 30 ans pour six mois d'apesanteur), le taux de graisse dans le sang augmente, la résistance à l'insuline croît et altère le système immunitaire. S'ajoutent à ces effets d'apesanteur, les effets des radiations cosmiques qui cassent les liaisons d'ADN avec des conséquences sur l'accroissement du vieillissement, le développement de cancers et l'opacification du cristallin (cataracte) [1].

MARS - Située entre La Terre et la ceinture d'astéroïdes, la planète Mars est la quatrième planète la plus éloignée du soleil. Sa distance au soleil représente une fois et demie la distance de la Terre au Soleil, sa vitesse orbitale moyenne est de 24 km/s, elle tourne sur elle-même en 24,6 heures et effectue un tour complet autour du soleil en 687 jours, soit presque deux années terrestres (1,88 exactement). Elle possède deux satellites nommés Phobos et Deimos. D'un diamètre moyen proche de 6786 kilomètres, sa masse représente 11% de la masse de la Terre et son atmosphère est principalement constituée de gaz carbonique (95% de CO₂, 3% de N₂, 2% d'Ar) avec des traces d'oxygène et d'eau. La pression atmosphérique n'est que de 800 Pa (variation entre 600 et 1200 Pa en fonction de la sublimation saisonnière du CO₂) pour 101325 Pa à la surface de la Terre pour la température normale (273,15 K) ou 0°C (moins de 1% de la pression atmosphérique terrestre). Mars possède des paysages variés et est parsemée de nombreux volcans élevés dont Olympus Mons. Haut de 21 km et large de 600, ce volcan est le plus élevé du système solaire. Mars possède également de nombreux canyons dont la vallée Marineris, longue de 4000 km et large de 800. Sa profondeur peut atteindre 10 km. Ses pôles sont recouverts de calottes gelées dont la superficie varie avec les saisons.



Simulation terrestre de séjours martiens

Les effets de l'isolement – Les résultats déduits de l'expérimentation Mars500 réalisée de juin 2010 à fin 2011 montrent les effets négatifs de l'isolement sur la santé physique et mentale. Les capacités cognitives diminuent, s'accompagnent de troubles du sommeil, de maux de tête, de troubles digestifs et l'agressivité entre individus augmente [2].



RÉFÉRENCES

- [1] Alexandra Pihen & Brigitte Godard (ASE) ; Vivre dans l'espace pas si simple, le défi de la pesanteur, Sciences & Vie, mai 2017, n° 1196, pages 54 à 57.
- [2] Alexandra Pihen & Bernard Comet (ASE) ; Vivre dans l'espace pas si simple, le défi des radiations, Sciences & Vie, mai 2017, n°1196, pages 58 à 61.
- [3] Cyprien Verseux ; Vivre sur mars, 366 jours pour tester la vie sur la planète rouge, Michel Lafon, septembre 2017, ISBN 978-2-74993259-0.

l'eau et l'oxygène. Cette production pourrait également s'obtenir à partir des conditions et des ressources martiennes. Certaines de ces ressources pourront être ainsi produites en utilisant des procédés physico-chimiques (production d'oxygène et d'eau potable, traitement des eaux, valorisation des effluents, valorisations des déchets...) tandis que d'autres nécessiteront le recours à la biologie (développement de micro-organismes pour le traitement des effluents, contrôle des communautés microbiennes, production d'aliments dans l'espace, cicatrisation des plaies ou des fractures...).

La présentation s'est terminée par un échange de questions-réponses. Parmi les réponses aux questions posées par l'auditoire, plus de 50 personnes, les conférenciers indiquaient avoir perdu la notion du temps, avoir perdu en spontanéité, avoir souvent regretté de ne pas pouvoir respirer à l'air libre, être devenus malgré eux quelque peu apathiques sans avoir été particulièrement gênés par l'absence de produits alimentaires frais (viandes, fruits, légumes). L'absence de projet personnel pourrait poser quelques difficultés sur le long terme.

Une conférence argumentée de situations et de cas concrets qui a su passionner un auditoire nombreux et peut-être susciter de futures vocations. **PG**



Sortie en combinaison martienne, crédit Christiane Heinicke.



CONFÉRENCE

SafranTech, le centre de recherche du groupe Safran

par Vincent Garnier, directeur de SafranTech
 Jeudi 14 septembre 2017 de 18h30 à 19h30

Salle de l'Espace du CNES, 2 place Maurice Quentin, 75001 Paris

Conférence organisée par la **Commission Propulsion** de 3AF
 en collaboration avec le Groupe Ile-de-France de 3AF



les faire mûrir grâce à un renforcement des relations avec le milieu scientifique et un approfondissement des architectures système. Son organisation le conduit à effectuer 15 % de la R&T du groupe et 80 % des travaux à bas TRL². A terme il devrait réaliser 25% de la R&T du groupe. Son effectif atteindra 460 chercheurs en 2018, avec 53 % de docteurs et 15 % de thésards. SafranTech est implanté sur trois sites en Ile-de-France et un en Aquitaine :

- Magny-les-Hameaux depuis 2015 : direction de SafranTech, Safran Additive Manufacturing, Direction Matériaux et Procédés, 6 pôles de recherche. ;
- Itteville depuis 2004 : Safran Composites ;
- Gennevilliers depuis 2017 : Safran Advanced Turbine Airfoil ;
- le Haillan prévu en 2018 : Safran Ceramics.

Les 6 pôles de recherche portent sur les thèmes de la figure 1 et constituent ce que le groupe estime optimal pour son innovation. Quatre plateformes technologiques orientées produit existent également. La recherche est classiquement organisée suivant le triangle : observer et mesurer, modéliser et simuler numériquement, apprendre et capitaliser.

Fig. 1 - Les pôles de recherche de SafranTech.

Conférence organisée par la Commission Propulsion en partenariat avec le Groupe Ile-de-France de 3AF.

Safran est un groupe international de haute technologie dont le chiffre d'affaires porte pour 60 % sur les systèmes de propulsion. La R&D y est particulièrement développée (10 % du chiffre d'affaires) et donne lieu à de nombreux dépôts de brevets (816 en 2016). Le groupe Safran est naturellement à la recherche de ruptures technologiques dans les domaines de l'énergie et de l'électricité et suit de près ce qui se fait dans le monde, en particulier pour les concepts ou ceux provenant de start-ups ou des GAFA¹.

SafranTech a été créé pour les recherches à long terme correspondant à un TRL égal ou inférieur à 3. Son objectif est d'identifier des technologies différentiantes et de

1. **GAFA**, acronyme des géants du Web, Google, Apple, Facebook, Amazon.

2. **TRL** (Technology Readiness Level), échelle utilisée pour traduire le niveau de maturité d'une technologie en vue de financer une activité de R&D ou d'intégrer une technologie dans un système ou un sous-système opérationnel.

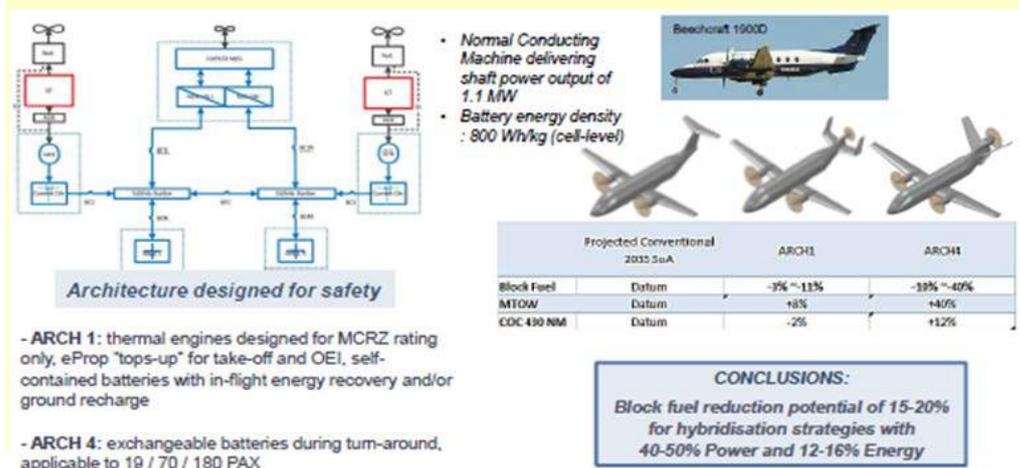


Fig. 2 - Études des systèmes de propulsion hybride.

SafranTech, le centre de recherche du groupe Safran

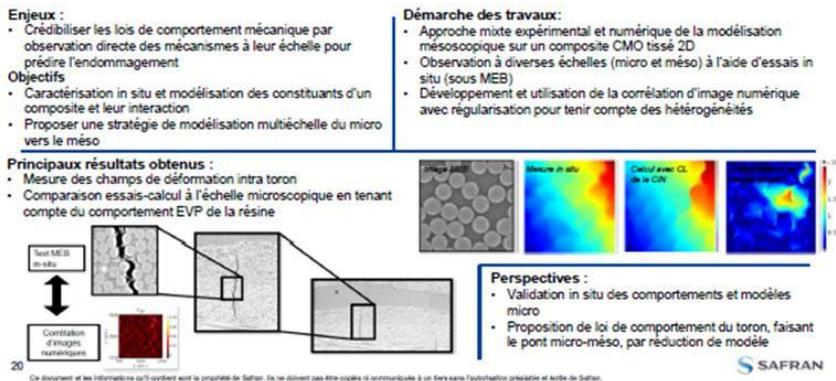


Fig. 3 - Mesures de champs de déplacement par corrélation d'images pour l'identification de modèles mécaniques de CMO.

3. LES pour Large Eddy Simulation (simulation des grandes structures de la turbulence). La LES est une méthode numérique qui consiste à modéliser les petites échelles de la turbulence et ne calculer que les grandes échelles.

Vincent Garnier s'est ensuite livré à une présentation des pôles et plateformes. Le pôle Energie et Propulsion vise la simulation de nouvelles architectures énergétiques et électriques des avions et le développement de technologies avancées, par exemple dans le programme PACYFIC dédié au commuter avec propulsion hybride série ou parallèle (figure 2).

Dans ce pôle sont menées des recherches sur les systèmes électriques, sur les architectures électriques et sur les composants électriques comme les convertisseurs compacts de puissance.

Le traitement du signal et de l'information constitue un autre pôle, reposant sur l'analyse d'images en liaison avec le contrôle, lequel représente jusqu'à 30 % du prix d'une pièce. Ce travail se fait avec l'aide de l'INRIA et a donné naissance à un laboratoire commun avec PSA et VALEO ; le programme PIXur fait partie de ce pôle. Dans le pôle Simulation est impliqué le développement de méthodes numériques visant à rendre plus sûre et plus précise la prévision des écoulements aérodynamiques complexes (exemple d'application : calcul LES³ non structuré du rotor transsonique 37).

Le pôle Matériaux et Procédés vise à atteindre les meilleurs niveaux pour les matériaux haute température, les matériaux allégés, les matériaux pour transmission de puissance, les traitements de surface et les procédés innovants. Il s'appuie sur le développement de nouvelles technologies de capteurs susceptibles d'opérer à température élevée (jusqu'à 1000 °C pour certains). Safran Composites veut maintenir et accroître son avance sur la technologie des composites 3D à matrice organique. Ceci nécessite le développement de nouvelles fibres et résines à TRL4, de maîtriser la robustesse et les

techniques de fabrication, en adoptant une démarche mixte théorique et expérimentale (figure 3).

Parmi les plateformes technologiques, on peut citer :

- les aubes de turbine haute pression, avec un ensemble de travaux portant sur la fonderie, l'usinage, le contrôle non destructif, les matériaux chauds, la simulation des procédés, les produits turbine ;
- la fabrication additive ;
- les matériaux céramiques, seuls matériaux susceptibles d'être utilisés aux niveaux de température requis par les moteurs futurs très comprimés (carbure, oxyde ou eutectique).

Le centre de R&T Safran Tech témoigne de la volonté du groupe Safran d'investir à long terme dans les technologies et les savoir-faire métiers. Quelques résultats ont déjà été obtenus et encouragent à poursuivre l'effort de développement des compétences et à renforcer les partenariats scientifiques.

Les principales questions posées à l'issue de la présentation ont porté sur les points suivants :

- La sélection des thèmes prioritaires.
- Le partage entre applications avion et applications hélicoptère.
- L'appui sur des start-ups.
- La comparaison avec les structures d'excellence de Rolls-Royce.

Merci à Vincent Garnier de nous avoir fait découvrir au travers de Safran Tech la dynamique du groupe Safran pour rester à la pointe du progrès en propulsion aéronautique.

PK

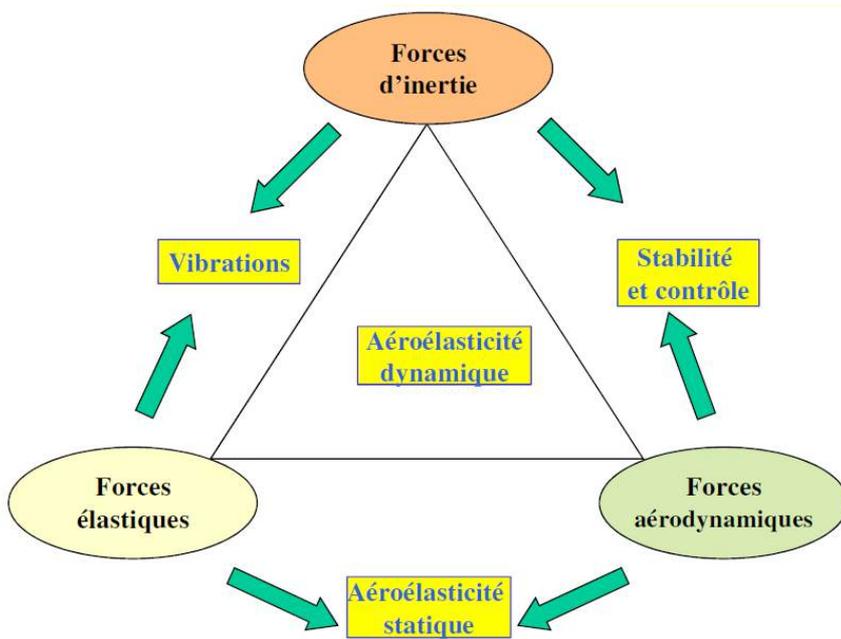


Fig. 1 - Le triangle aéroélastique de Collar.

1. Jean-Pierre Grisval est président de la commission technique Structures de 3AF, ex-directeur du département Aéroélasticité et Dynamique des Structures de l'ONERA.

L'aéroélasticité est une discipline scientifique de couplage mettant en jeu l'interaction entre forces d'inertie, forces élastiques et forces aérodynamiques. Elle s'applique à une grande variété de structures intéressant le génie civil (ponts, tours), les structures aérospatiales (avions, hélicoptères, moteurs, missiles et lanceurs) et la production d'énergie (turbines à vapeur, éoliennes). Elle couvre aussi une grande variété de phénomènes qui sont schématiquement classés en stabilité aéroélastique (divergence statique, flottement, LCO -Limit Cycle Oscillation-) et en réponses forcées à l'aérodynamique (vibrations induites par le mouvement des chocs, la turbulence, les tourbillons et les sillages). Un grand nombre de termes spécialisés permettent de distinguer certains phénomènes spécifiques : flottement ou flutter, divergence statique, cycles limites, buffeting (tremblement), etc. L'aéroélasticité est, compte tenu des conséquences structurales négatives qu'elle peut entraîner, liée à la dynamique des structures. Elle s'adapte constamment aux évolutions des technologies aérospatiales : recours accrues au numérique, moyens de contrôle, matériaux

composites. Une bonne vision de ce qu'est l'aéroélasticité est donnée par le triangle de Collar (figure 1).

L'aéroélasticité possède une longue histoire puisqu'elle est née avec les premiers développements de l'avion à partir de 1903 ; il s'agissait à l'époque de contrer l'instabilité de divergence en torsion de l'aile et le roulis provoqué par cette torsion. Les approches analytiques ont été développées à partir des années 1930 et la conception structurale s'est imposée à partir des années 1940. Aujourd'hui l'aéroélasticité a atteint une certaine maturité et s'intéresse au contrôle des charges, à la voilure active et à l'optimisation aéroélastique.

Toute discipline scientifique possède ses spécificités. Pour l'aéroélasticité des avions, une des difficultés est qu'il est nécessaire d'analyser un grand nombre de configurations, en tenant compte :

- du domaine de vol ;
- de configurations massiques évolutives (carburant, largage de charges externes) ;
- de la nature et de la répartition des charges externes ;
- d'éventuelles pannes des systèmes de commande de vol ;
- des excitations extérieures (aérodynamiques et dues à la séparation des charges) ;
- des manœuvres.

L'aéroélasticité intéresse aussi au premier chef les turbomachines dont l'aérodynamique est complexe (présence de chocs, de décollements et de jeux), (figure 2). L'hélicoptère est également concerné au niveau du rotor principal (chocs, effets visqueux et de sillages, décrochage dynamique, grands déplacements) et au niveau de son rotor de queue (tail shake).

Les études d'aéroélasticité font appel simultanément à des essais et à la simulation numérique :

- pour les études expérimentales, on réalise des essais en vol sur des

Aéroélasticité et vibration des avions

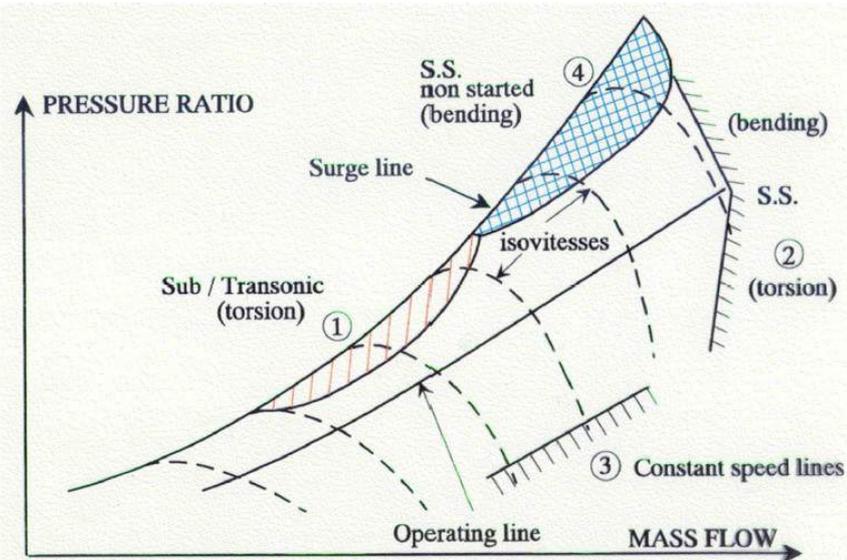


Fig. 2 - Instabilités aéroélastiques d'une soufflante de turbomachine.

maquettes rigides, ou dynamiquement semblables en souffleries ; des essais au sol de vibrations sont également réalisés ;

- la simulation numérique repose sur la modélisation aérodynamique des écoulements, sur celle de la structure équipée de ses systèmes et sur un algorithme de couplage entre fluide et structure.

La simulation numérique met en jeu pour la structure une dynamique qui va des basses fréquences (quelques Hertz pour l'A380) à des hautes fréquences (quelques kiloHertz pour des aubes de turbines). Le calcul par éléments finis est généralement utilisé et il est recalé avec les données expérimentales obtenues au sol pour donner naissance à une identification modale (fréquences, masses généralisées, formes

modales, amortissements modaux).

La simulation numérique de l'écoulement utilise des versions spécialisées de codes généraux résolvant les équations de Navier-Stokes. Pour sa part, l'ONERA a développé le logiciel elsA_Ael (figure 3). Ce logiciel, en cours de développement, qui prend en compte un maillage déformable, a été appliqué à la voilure de l'A340 et les résultats du calcul ont été comparés aux mesures effectuées en essais en vol : la prévision du dévissage et du déplacement vertical est plutôt encourageante. Une seconde application a porté sur l'efficacité d'une gouverne.

Le calcul couplé fluide-structure n'est pas encore utilisé systématiquement dans la mesure où il nécessite de très longs temps d'ordinateur. En pratique on utilise encore des méthodes alternatives de couplage basées sur des méthodes de surfaces portantes dans le domaine fréquentiel.

Des essais sont réalisés au sol pour déterminer la dynamique de la structure. Un bon exemple est relatif à l'A350 qui a fait l'objet d'une campagne conjointe ONERA/DLR en avril 2014 à Toulouse (figure 4). Ces essais au sol précèdent des essais en vol requis par les organismes internationaux de certification comme l'EASA. Ces essais ultimes visent à vérifier qu'il existe bien une marge par rapport au domaine de vol opérationnel (norme CS25). Cette marge doit être de 15 % en terme de vitesse pour les avions de transport civils. Ces vols présentent un certain risque.

□ Développement d'un environnement de couplage fluide structure :

- Modules transfert de charges et de déplacements
- Modules de déformation de maillages
- Modules de couplage temporel

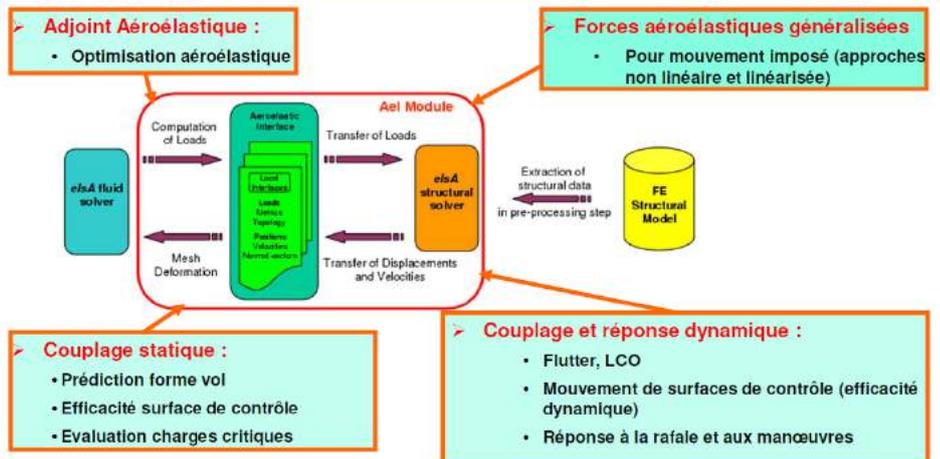
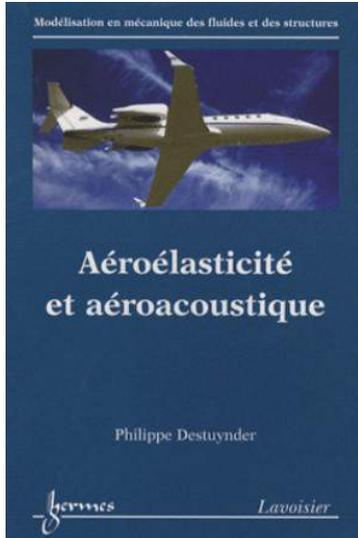


Fig. 3 - L'extension du logiciel elsA de l'ONERA à l'aéroélasticité : elsA_Ael.

Aéroélasticité et vibration des aéronefs



OUVRAGE

Aéroélasticité et aéroacoustique
par Philippe Destuynder, Editeur
Hermès—Lavoisier, collection :
Modélisation en mécanique des
fluides et des structures,
371 pages, 1er janvier 2007,
EAN13 : 978.2.74621.706.5.

Fig. 4 - Essais de vibration de l'A350 en avril 2014.



Chez Boeing, ils sont réalisés avec seulement deux pilotes à bord (cas du 787).

L'orateur a ensuite passé en revue un certain nombre de travaux récents :

- étude d'un volet de bord de fuite oscillant ;
- interaction aéroélastique voilure/nacelle oscillante ;
- calculs de cycles limites d'oscillation ;
- réponse à la rafale avec braquage d'aileron ;
- contrôle de charge à la rafale en transsonique ;
- contrôle actif du flottement sur maquette en soufflerie.

Les recherches futures porteront sur des bases de données et outils numériques validés, sur le progrès des méthodes numériques (prise en compte des incertitudes) et sur la faisabilité de moyens de contrôle efficaces. De nouveaux challenges se font jour pour de nouvelles configurations d'avion et de moteur (aile laminaire, aile volante, aile en flèche inverse, aile haubanée, CROR), de nouveaux matériaux, de nouvelle technologie (morphing de structure) et de nouveaux véhicules supersoniques ou hypersoniques.

Cette présentation parfaitement argumentée et illustrée a donné lieu à de nombreuses questions, dont les principales ont été les suivantes.

- Rôle des incertitudes en termes de fréquences, raideurs et amortissements ? Un problème difficile est la prise en compte des non-linéarités.

- En raison des puissances de calcul croissantes, peut-on réduire les essais et leur coût ? La durée des essais de vibration au sol a été raccourcie, les essais en vol diminués. Les risques ont été réduits.
- Existe-t-il des bifurcations non-linéaires ? C'est possible mais cette question n'en est qu'au stade de la recherche.
- L'amortissement peut-il contribuer à déstabiliser le système ? L'amortissement structural amortit, l'amortissement aéroélastique peut déstabiliser.
- Quel est le fonctionnement de la commission technique Structures de 3AF ? Jean-Pierre Grisval a rappelé que cette commission technique organise des Journées Scientifiques dont sont parties prenantes l'ONERA, le CNAM, l'ISAE-Supaéro, l'ENS Cachan et les Industriels. La prochaine Journée Scientifique est prévue le 6 décembre à Châtillon sur le thème « Big Data and Structures ».

Une conférence donc tout à fait réussie dont il faut remercier Jean-Pierre Grisval.

PK

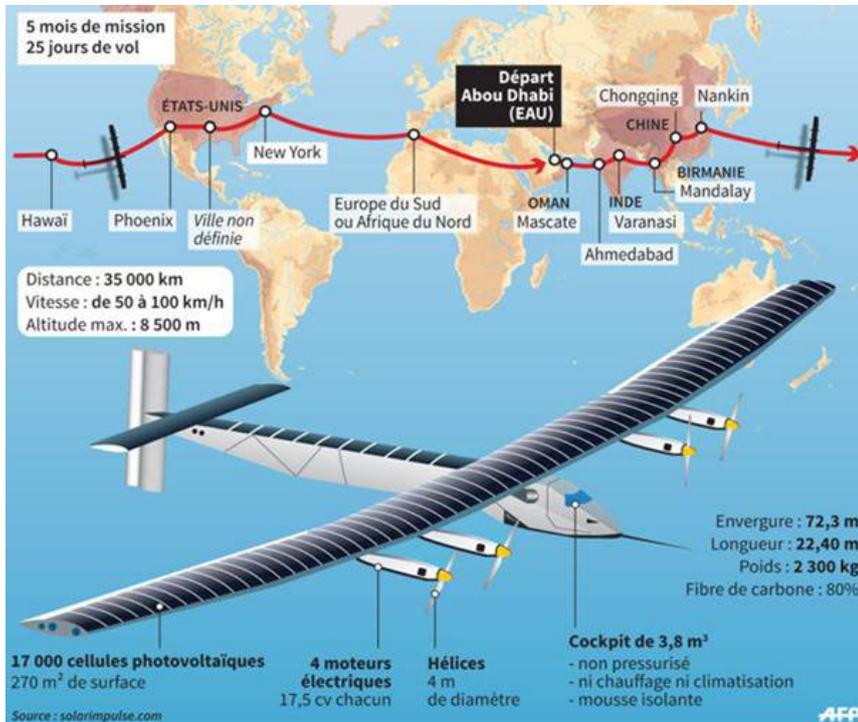


Fig. 1 - L'exploit de SOLAR IMPULSE fait rêver mais n'est pas extrapolable à des avions conventionnels.

1. Pierre Duval, consultant aéronautique spécialiste de l'aviation générale et militaire, pilote et chroniqueur de la revue **Info-Pilote**, mensuel édité par la Fédération Française d'Aéronautique (FFA). Directeur de la société Demeteris, société de conseil et d'intégration de services spécialisée dans l'aéronautique, la défense et les systèmes d'information.

Il est actuellement beaucoup demandé à la Fée Électricité, qu'il s'agisse de compenser la déplétion des ressources énergétiques fossiles ou d'améliorer la qualité de l'environnement. L'aviation n'échappe pas à ce mouvement. Pierre Duval a une longue expérience de pilote privé et il est particulièrement bien informé des questions de réglementation, de sécurité et d'environnement. Il nous a donc livré sa vision de l'avenir de l'aviation électrique.

Prenant appui sur l'exploit réalisé par Solar Impulse B (figure 1), l'orateur s'est efforcé dans son introduction de préciser ce que peut apporter la propulsion électrique et ce qui lui est inaccessible. L'avion électrique ne peut pas être :

- **solaire** : même en revêtant toute la surface supérieure des ailes de cellules solaires souples et en tablant sur un rendement de conversion du rayonnement solaire en électricité optimiste, la production électrique diurne ne peut représenter que quelques pourcents du besoin énergétique pour voler ;

cette solution ne convient donc que pour des avions très légers, très souples et très lents avec un seul siège ;

- **économique** : l'avion électrique sera cher en raison des lourds investissements de R & D qui seront nécessaires, de la longue durée d'adoption par le marché et de la relative faiblesse de ce marché (aviation légère) ;
- **non polluant** : la production des composants électriques, batteries et moteurs en particulier, fait appel à des technologies lourdes et grandes consommatrices d'énergie, le recyclage des matériaux reste encore une inconnue ; sur ce point, une analyse de cycle de vie s'impose ;
- **facile à mettre en œuvre** : un effort important devra être consenti sur les infrastructures de charge et des contraintes opérationnelles pourraient apparaître.

L'avion léger électrique répond donc à un principal objectif : faire face à l'évolution des contraintes générées par les gênes ressenties par les riverains des aéroports. La contrainte la plus immédiate touche le bruit car elle menace la survie des aéroports d'aviation générale situés en zone urbaine ; à plus long terme, il faudra rechercher une amélioration des performances énergétiques et une diminution des émissions chimiques.

Des perspectives nouvelles existent comme la propulsion distribuée, illustrée sur les figures 2 et 3 par le démonstrateur X57 Maxwell de la NASA et le concept AMPERE de l'ONERA.



Fig. 2 - Démonstrateur X57 Maxwell de la NASA.

L'avenir de l'aviation à propulsion électrique, du rêve à la réalité



Fig. 3 - Concept AMPERE de l'ONERA.

le coût accru, tels des avions régionaux ou des court-courriers. C'est en effet le choix commun fait récemment par Airbus, Siemens et Rolls-Royce (figure 4). D'autres estiment que certains problèmes comme la transmission de puissance vont devenir de plus en plus difficiles à résoudre au fur et à mesure que la taille de l'avion augmente. En fait des données détaillées manquent pour savoir où se situe la taille optimale.

Un autre sujet d'actualité porte sur le concept « On Demand Mobility » et repose sur l'idée du taxi aérien électrique pour éviter les encombrements routiers dans les mégapoles. De nombreux projets existent, émanant soit de start-ups, soit de grands groupes aéronautiques (Airbus Vahana par exemple figure 5), soit encore de grands groupes informatiques. Ce concept pose de nombreuses questions.

- Parviendra-t-on à des batteries à hautes performances et bas coût ?
- Quels critères de sécurité retenir ?
- Quelles infrastructures de recharge et de support à prévoir ?
- Comment gérer l'espace aérien et l'espace au sol ?
- Existe-t-il un « business case » ?

Seuls certains pays croient dans cette formule : États-Unis et Chine. En fait beaucoup de projets présentés sont imprécis et relèvent plus d'une communication pour attirer des financements que d'une analyse technico-opérationnelle. Beaucoup de projets supposent un vol automatique et s'inspirent de la « recherche de

Les avantages potentiels de la propulsion distribuée tiennent à plusieurs spécificités :

- possibilité de diminuer la surface alaire et la traînée induite,
- capacité à remplacer les commandes de vol,
- fiabilisation de la propulsion et simplification de la transmission de puissance.

À contrario, la propulsion distribuée nécessite de complètement revoir les normes de certification.

Cette voie impose, pour tenir compte des contraintes opérationnelles, l'hybridation des sources d'énergie. Cette approche consiste à produire l'électricité par un moteur thermique, à la stocker dans des batteries puis à la transmettre à un moteur électrique entraînant un ou plusieurs dispositifs de propulsion. Ainsi la « meilleure » énergie pourrait-elle être choisie pour chaque phase de vol. L'intérêt de l'hybridation fait encore l'objet de débats. Pour l'orateur, l'hybridation sera surtout intéressante pour les avions d'une taille justifiant la complexité, la masse et

OUVRAGES

Le stockage électrochimique de l'énergie, Verrous actuels et recherches développées par le réseau RS2 - Stockage de l'énergie : batteries et super condensateurs, Volume 1 par Jean-Marie Tarascon, Patrice Simon, Éditeur Istes, collection Énergie, 15 mars 2015, 98 pages, EAN13 : 9.781.78405.066.5

Électrodes de batteries Li-ion, Matériaux, mécanismes et performances - Stockage de l'énergie - Batteries et super condensateurs, Volume 2, par Laure Monconduit, Laurence Croguennec et Rémi Dedryvère, Éditeur Istes, collection Énergie, 2 mai 2015, 98 pages, EAN13 : 9.781.78405.078.8.

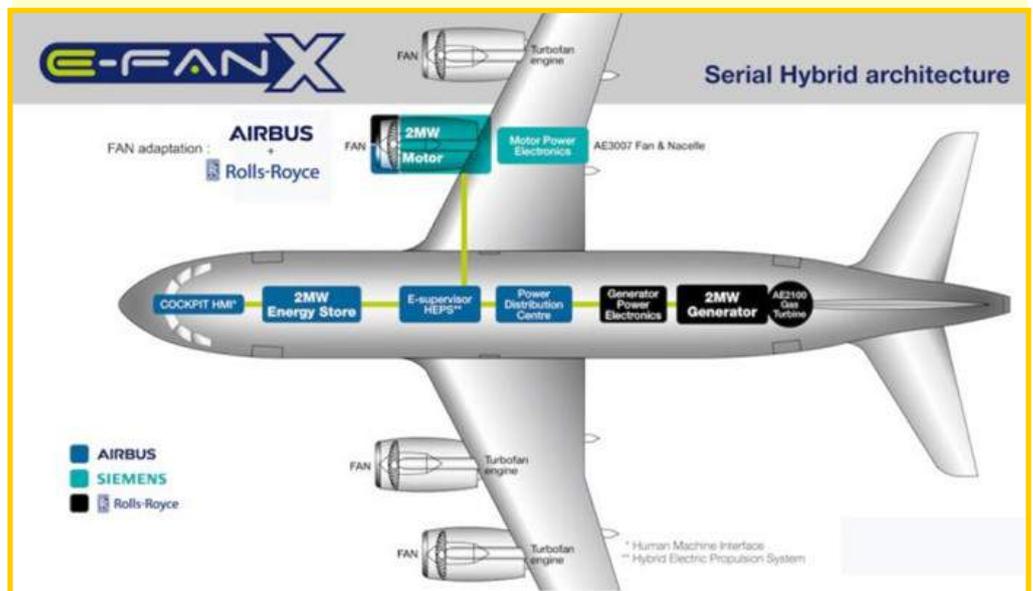


Fig. 4 - Le projet e-Fan X européen.

L'avenir de l'aviation à propulsion électrique, du rêve à la réalité



Fig. 5 - Le taxi aérien Vahana d'Airbus.

OUVRAGES

Objectif Soleil, l'aventure de Solar Impulse par Bertrand Piccard et André Borschberg, Éditeur Stock, 354 pages, 22 février 2017, EAN13 : 978.2.23408.083.6

Solar Impulse, le premier tour du monde en avion solaire, Éditeur Favre, 6 février 2017, 188 pages., EAN13 : 9.782.82891.608.4.

Le salle saint Lambert de la mairie du 15ème.



- Qui paiera les infrastructures de recharge, qui fournira la puissance nécessaire ?
- Les batteries de l'automobile, aux caractéristiques imparfaites mais seules accessibles économiquement, seront-elles suffisantes ?
- L'électricité permettra-t-elle de réduire significativement le bruit et l'impact des gaz à effet de serre ?

La France possède, ainsi que l'Allemagne, des acteurs compétents et des projets innovants ; peut-être devraient-ils être rassemblés ?

Certaines voix sont critiques vis-à-vis de l'avion électrique mais :

- il n'y a pas d'autres options pour répondre aux contraintes environnementales,
- l'enjeu européen est de rester en tête de l'industrie aéronautique,
- les jeunes générations ont besoin de projets enthousiasmants.

Il manque toutefois une réflexion approfondie sur les infrastructures.

Merci à Pierre Duval de nous avoir fait partager sa vision du futur de l'avion électrique et d'avoir fait un tri argumenté entre ce qui peut être possible et ce qui est spéculatif.

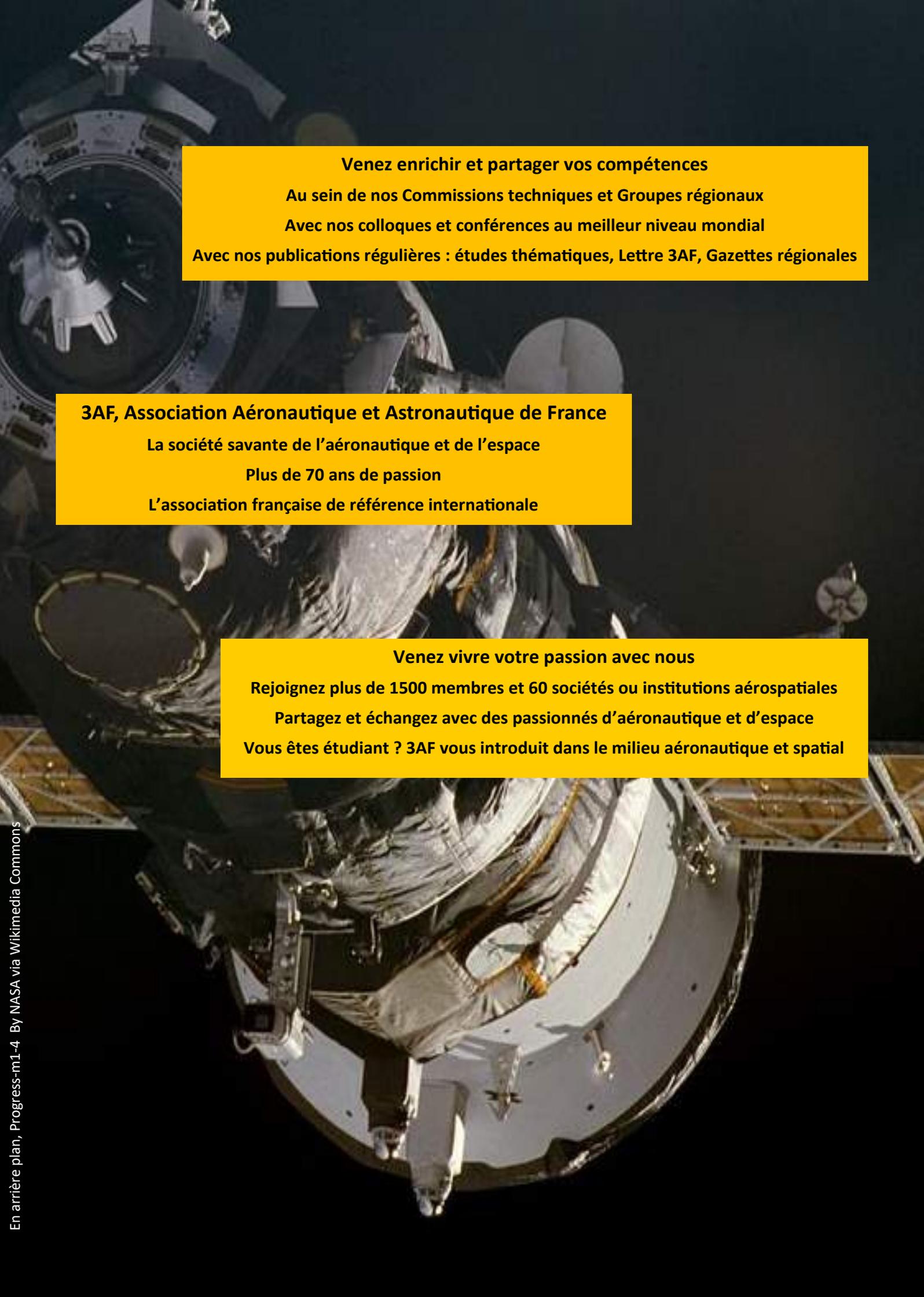
PK

garage » du début des grands groupes informatiques.

À partir des différents concepts présentés, Pierre Duval a eu le courage de définir quels seront au fil des années les avions électriques et hybrides du quotidien. Voici selon lui les étapes à franchir :

- 2020 : la formation des premiers pilotes « électriques »,
- 2025 : le transport d'une tonne de fret,
- 2022/2025 : le taxi aérien ?
- 2020 : le voyage privé pour deux passagers (LSA), 2025 : le voyage privé pour 6 passagers,
- 2027/2030 : le transport commercial de 9 passagers,
- 2035/2040 : le transport commercial de 20 passagers.

Seule une démarche incrémentale permettra de suivre cette feuille de route et sera vraisemblablement accompagnée d'enjeux de fond considérables : une compétition entre avionneurs et motoristes, la volonté de la Chine d'imposer ses standards, la création de nouvelles réglementations... Elle posera aussi les questions qui suivent.



Venez enrichir et partager vos compétences

Au sein de nos Commissions techniques et Groupes régionaux

Avec nos colloques et conférences au meilleur niveau mondial

Avec nos publications régulières : études thématiques, Lettre 3AF, Gazettes régionales

3AF, Association Aéronautique et Astronautique de France

La société savante de l'aéronautique et de l'espace

Plus de 70 ans de passion

L'association française de référence internationale

Venez vivre votre passion avec nous

Rejoignez plus de 1500 membres et 60 sociétés ou institutions aérospatiales

Partagez et échangez avec des passionnés d'aéronautique et d'espace

Vous êtes étudiant ? 3AF vous introduit dans le milieu aéronautique et spatial