



**Aéronautique & Astronautique**  
**Les Conférences**  
**du Groupe**  
**3AF Île-de-France**  
**2018-2019**

**Comptes-rendus – n°4**

**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](mailto:gestionmembres@aaaf.asso.fr)

[www.3af.fr](http://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](mailto:gestionmembres@aaaf.asso.fr)

## **3AF – GROUPE ÎLE-DE-FRANCE**

email : [3af.idf@gmail.com](mailto: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

**Préparation des conférences** : Nicolas BÉREND, Cyrille CHAISY, Patrick GILLIÉRON, Paul KUENZMANN, Gérard LARUELLE & Christelle ROUX.

**Rédaction des Comptes-Rendus** : Cyrille CHAISY, Paul KUENTZMANN, Patrick GILLIÉRON, Sophie PLAZANET & Christelle ROUX

**Éditeurs** : Patrick GILLIÉRON et Christelle ROUX

**Relectures** : Francis HIRSINGER

# Éditorial

Voici le quatrième recueil des résumés des conférences organisées par le Groupe 3AF Ile-de-France à la mairie du 15ème pour la période 2018 et 2019. Ce recueil, comme les précédents, a pour objectif de laisser une trace des informations essentielles communiquées par des spécialistes pour des passionnés de l'aéronautique et de l'espace.

Ces résumés sont rédigés par des membres du bureau du groupe Ile-de-France puis validés par les conférenciers mais une rédaction par ces derniers est possible et peut s'envisager dans le cadre d'une publication d'auteur. Sur les seize conférences proposées en 2018 et 2019, huit conférences portaient sur le spatial et huit sur l'aéronautique.

Certaines conférences aéronautiques sont proposées en lien avec les commissions techniques "Aérodynamique" et/ou "Aviation Légère et Machines Dérivées" (ALMD) et/ou "Propulsion" de la 3AF. Un article supplémentaire a été ajouté pour capitaliser sur la Journée "Aviation Légère & Environnement" organisée avec la commission ALMD en lien avec la Fédération Française Aéronautique (FFA) et le Comité Régional Aéronautique d'Ile-de-France (CRAIF).

Depuis la conférence du 12 novembre 2019, sous réserve d'autorisation des conférenciers, chaque conférence fait l'objet d'un enregistrement vidéo mis à disposition des membres pour voir et revoir les moments forts et/ou revenir sur des points particuliers. Ces enregistrements, disponibles sur la chaîne [YouTube du groupe 3AF IdF](#), ne comblent évidemment pas le plaisir des rencontres et l'intérêt du direct pour les échanges.

Si vous possédez une compétence particulière, si vous connaissez des collègues ou anciens collègues dont la compétence, l'expertise et/ou l'expérience mériteraient d'être partagées, prenez contact avec le bureau du groupe 3AF Ile-de-France via l'adresse email [3af.idf@orange.fr](mailto:3af.idf@orange.fr).

Si vous avez enfin un peu de temps et que vous souhaitez participer bénévolement aux activités proposées par le bureau du groupe Ile-de-France telles l'organisation des conférences, la rédaction des résumés, l'élaboration des Gazettes, des Mini-Gazettes... et autres Flashes ; n'hésitez pas ! Contactez le bureau à l'adresse précédente.



**Pour le bureau du groupe 3AF Ile-de-France : Patrick Gilliéron**

**PS :** les textes surlignés de couleur bleue sur la version numérique de ce document sont associés à des liens Web actifs, cliquez dessus pour activer le lien.



# Sommaire

<b>Pascal Bultel - Les remorqueurs spatiaux, d'Appolo à Nomostro.....</b>	<b>06</b>
<b>Gérard Théron - Vers un renouveau du transport supersonique.....</b>	<b>09</b>
<b>Christophe Bonhomme et Emmanuel Edeline - Prometheus.....</b>	<b>14</b>
<b>Christophe Bonnal &amp; Jean-Luc Wibaux - Le tourisme spatial : mythe ou réalité ?.....</b>	<b>17</b>
<b>Jean Hermetz - Le concept d'avion électrique AMPERE.....</b>	<b>21</b>
<b>Pascale Alajouanine - La voltige aérienne ; la tête à l'envers, les pieds sur terre.....</b>	<b>25</b>
<b>Benoît Biraud - SaM146, histoire d'une coopération franco-russe.....</b>	<b>29</b>
<b>Philippe Galland - OneWeb : Méga-Constellations.....</b>	<b>31</b>
<b>Sébastien Bourdarie - L'environnement spatial et ses effets sur les satellites.....</b>	<b>36</b>
<b>Christian Lardier - Les stations orbitales.....</b>	<b>40</b>
<b>Jean-Paul Perrais - L'industrie aéronautique chinoise.....</b>	<b>44</b>
<b>Christophe Bonnal - L'ascenseur spatial : mythe ou réalité ?.....</b>	<b>47</b>
<b>Denis Gély - Le bruit du transport aérien.....</b>	<b>51</b>
<b>Laurent Baron - Aérodynamique et Consommation des TGV.....</b>	<b>54</b>
<b>Richard Heidmann &amp; Aline Decadi - L'Homme sur Mars : les préparatifs.....</b>	<b>56</b>
<b>Georges Ville - Cinquantenaire de l'Accord AIRBUS.....</b>	<b>61</b>
<b>Journée Aviation Légère &amp; Environnement : journée organisée en lien avec la Fédération Française Aéronautique (FFA) et le Comité Régional Aéronautique d'Ile-de-France (CRAIF).....</b>	<b>67</b>

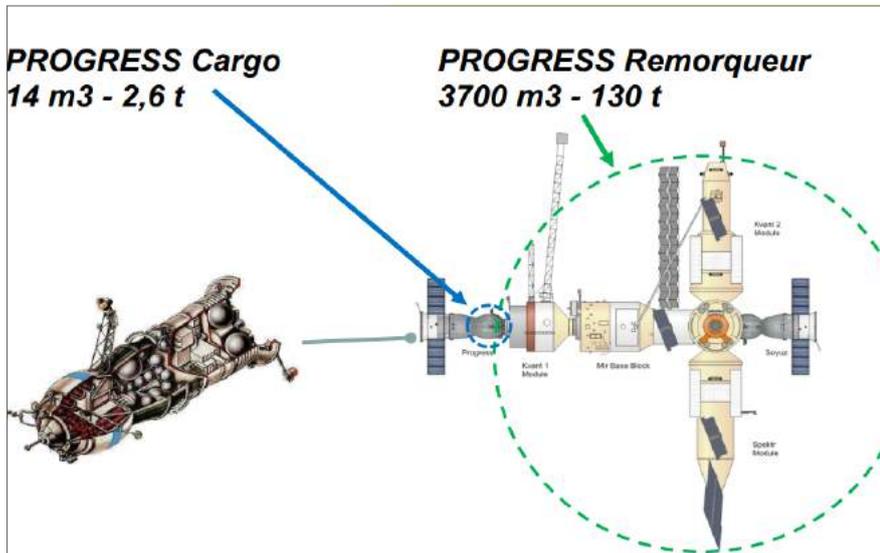


Fig. 1 - Le Progress, cargo ou remorqueur.

**P**ascal Bultel a livré une présentation très imagée et originale, en établissant un lien entre les nombreux projets qui ont vu le jour depuis les premières années de la conquête spatiale et les anticipations de la science-fiction qui les ont précédés ou accompagnés.

Le concept de remorqueur est né dans le domaine maritime (brevet de Jonathan Hulls de 1832) ; il décrivait un bateau capable de tirer ou de pousser un autre bâtiment pour la manœuvre dans les ports. La taille des bateaux ayant fortement augmenté depuis cette époque ; les remorqueurs sont devenus des auxiliaires indispensables du trafic maritime.

Un remorqueur spatial (« space tug ») reprend les caractères de propulsion et de navigation autonomes mais y ajoute pour certains, en plus du déplacement d'une charge utile externe, la capacité de ravitaillement d'un autre vaisseau spatial. Voici quelques exemples. Le premier remorqueur spatial opérationnel répondant à la définition précédente a été le « Service Module » du programme Apollo. La station spatiale internationale ISS est desservie par le Progress russe dont le premier lancement est intervenu en 1978, Progress est à la fois cargo et capable de maintenir à poste l'ISS grâce à son système de propulsion chimique de 1000 N pour les moteurs : faible taux de dilution, concept 610-25 ; (figure 1).

L'accostage automatique a été développé dès 1967 et les ATVs européens (figure 2), dont cinq exemplaires ont été lancés avec succès, ont inauguré la maîtrise de l'accostage centimétrique par laser ; l'ATV détient encore le record du monde de masse déplacée (400 t).

Les remorqueurs spatiaux ont évolué au fil des années et notamment sur le plan de la propulsion. Tous les moyens connus ou futuristes ont été étudiés.

- La propulsion chimique, encore largement répandue ;
- La propulsion nucléaire ; celle-ci a connu des développements au sol dans les années 1970 : programme Nerva aux Etats-Unis pour le programme post-Apollo NOVA, moteurs-fusées nucléaires russes de la série RD 400, projets ERATO et MAPS du CEA. Aucun de ces programmes n'a débouché sur des applications en raison d'un coût élevé de développement, partiellement lié aux questions de sécurité.
- Le solaire thermique (projet PHAETON de l'ONERA).
- Le solaire voltaïque qui constitue une solution de grand avenir, en liaison avec la propulsion plasmique, mais qui pour l'instant est limité à des puissances

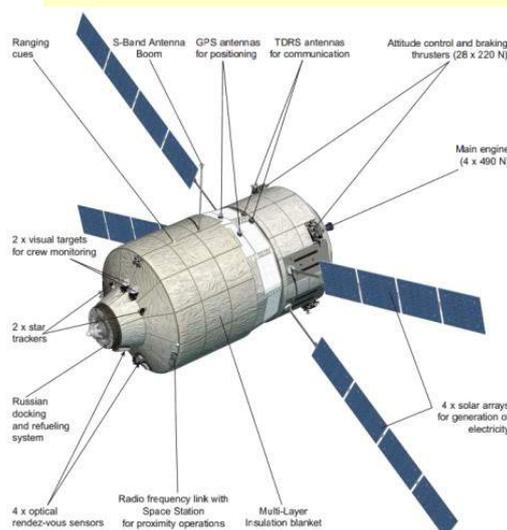


Fig. 2 - L'ATV, cargo, ravitailleur et remorqueur.

## Les remorqueurs spatiaux, d'Appolo à Nomostro

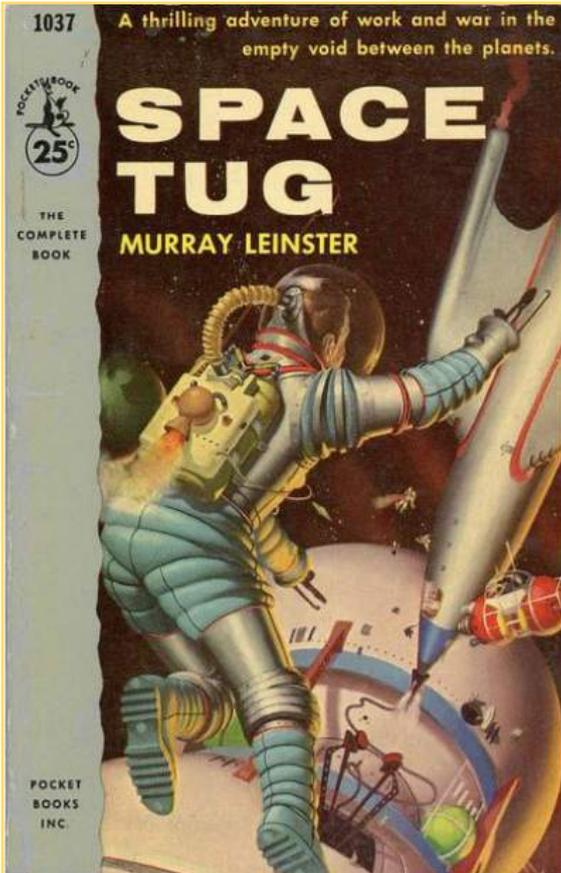


Fig. 3 - Le premier remorqueur spatial de la science-fiction.

-ces électriques inférieures à 20 kW et donc à de faibles poussées.

L'auteur a présenté une synthèse de la plupart des projets de remorqueur spatial développés par les différents pays :

- États-Unis : 1969-1972, programme post-Apollo (Nuclear Shuttle) puis Space Tug. 1984-1987, Orbital Manoeuvring Vehicle (TRW). 1984-1989, Orbital Transfer Vehicle (NASA). 2009, AD Astra Solar Solar Electric Tug (propulsion VASMIR), Boeing /DARPA FAST (propulsion plasmique).
- Union soviétique puis Russie : 22-10-67, accostage automatique de Cosmos 186 et 188. 1978, Progress ; Progress est le premier remorqueur polyvalent produit en grande série, sur la base du vaisseau Soyouz, système KURS d'accostage automatique par guidage radio. 1988-2008, concept MEK d'Energia (propulsion électrique de 300 N).
- Europe : 2008, premier lancement de l'ATV Jules Vernes, cargo, ravitailleur et remorqueur. Les européens possèdent la majeure partie des technologies-clefs dont la propulsion plasmique (Safran).

Un nouveau paradigme a émergé en 1979 (Chris Foss), c'est le « mining », c'est-à-

dire l'exploitation de ressources extraterrestres minérales, provenant d'astéroïdes ou de Mars. Les chercheurs situent le début du mining vers 2065 et un remorqueur spatial extrapolant les technologies disponibles et de caractéristiques suivantes :

- masse sèche du remorqueur en LE : 150 t ( 3 lancements ) ;
- panneaux solaires de 120 t fournissant 9,5 MW ;
- propulsion plasmique très forte puissance (Le propulseur plasmique le plus puissant en développement est le NASA 457M.v2 dont la poussée de pointe est 2,3 N à 50 kW) ;
- fluide propulsif : 60t (xénon ou argon).

La seconde partie de la présentation a porté sur l'histoire du remorqueur spatial dans la science-fiction. Il est intéressant de noter que le terme de space tug a été utilisé pour la première fois en 1953 par Murray Leinster dans une publication (figure 3), donc bien avant le début de la conquête spatiale.

Quelques décennies plus tard, le remorqueur spatial a été un acteur dans les films de science-fiction, en particulier dans la série Alien à partir de 1979 : c'est le fameux Nomostro qui figure dans le titre de cette présentation. Le concepteur de Nomostro, Chris Foss, également promoteur du mining, s'est inspiré du nuclear shuttle et a imaginé un remorqueur de 334 m de long à propulsion nucléaire par fusion (figure 4). Seule une maquette au centième a été construite pour les besoins cinématographiques par Lockheed, ainsi qu'une maquette de raffinerie orbitale. La maquette Nomostro a mal vieilli et a dû être restaurée.

Le remorqueur spatial a donc été un acteur discret du spatial, tant au niveau des réalisations concrètes que de la science-fiction, sans que l'on puisse établir si ce sont les projets industriels qui ont inspiré des artistes visionnaires ou l'inverse.

La flexibilité d'emploi du remorqueur spatial et sa modularité ont amené de nombreuses technologies à progresser. A court et moyen termes, ces véhicules seront capables de transférer une dizaine de tonnes, à long et très long termes, cette



Fig. 4 - Nomostro.

# Les remorqueurs spatiaux, d'Appolo à Nomostro

capacité devrait atteindre des centaines de tonnes.



Pascal Bultel à la mairie du 15ème.

A l'issue de cette brillante présentation, des questions ont été posées sur les points suivants :

- la possibilité d'utiliser l'air résiduel pour maintenir l'ISS à poste ;
- les solutions envisagées pour le retour à terre dans le cas du mining ;
- la propulsion électrique pour le maintien à poste de l'ISS ;
- projets internationaux ;
- suite de l'ATV ;

- concept Skyhook.

Merci à Pascal Bultel pour cette présentation qui a dû combler tant les scientifiques et techniciens que les passionnés de science-fiction.

PK

The poster features the 3AF logo and the title 'Les Conférences du Groupe Ile-de-France'. It specifies the date as 'MARDI 6 FÉVRIER de 18h30 à 20h' at the 'Mairie du 15'. The speaker is identified as 'Pascal BULTEL, spécialiste des concepts avancés et président de la commission Exploration Spatiale et Observation de la 3AF'. The poster also includes a small image of a satellite and a calendar icon for the 15th.

3AF Les Conférences du Groupe Ile-de-France  
LES REMORQUEURS ORBITAUX D'APOLLO AU NOSTROMO  
Par Pascal Bultel, spécialiste des concepts avancés et président de la commission Exploration Spatiale et Observation de la 3AF.  
Une conférence organisée par le Groupe Ile-de-France de la 3AF à la Mairie du XVe arrondissement, 31 rue Péclet - 75015 Paris (Métro Vaugirard)  
MARDI 6 FÉVRIER de 18h30 à 20h  
Pascal BULTEL, spécialiste des concepts avancés, retracera l'histoire et l'évolution des remorqueurs orbitaux, systèmes aux architectures multiples à propulsion chimique, solaire électrique ou nucléaire. La présentation couvrira la période allant du 1er brevet de remorqueur jusqu'aux concepts de science-fiction en passant par APOLLO, le vaisseau ravitailleur PROGRESS et le véhicule automatique de transfert européen désigné ATV.  
INSCRIPTION OBLIGATOIRE sur le site 3AF <http://www.3af.fr/rubriques/Manifestations/Conferences>  
Entrée gratuite et ouverte à tous, membres et non membres 3AF  
Voir le site 3AF à l'adresse : <https://www.3af.fr/>  
CALENDRIER DES PROCHAINES CONFÉRENCES 3AF ILE-DE-FRANCE (PROJETS)  
Vers un remorqueur du transport supersonique par Grand-Théâtre, 3AF à Du ARBUS, mardi 13 mars, 18h30/20h  
Le tourisme spatial par Christophe Barnal, CNES, mardi 15 mai, 18h30/20h  
3AF - Association Aéronautique et Astronautique de France, 8 rue Ducloux, 75116 Paris - Groupe 3AF - Ile de France <https://www.3af.fr/>



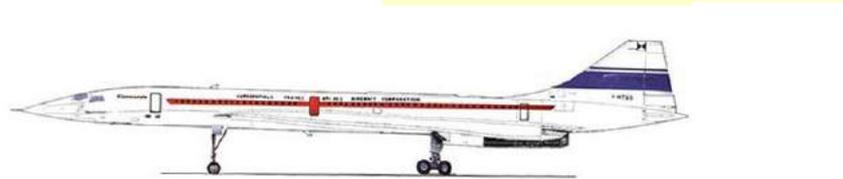


Fig. 1 - Avion Concorde by British Airways.

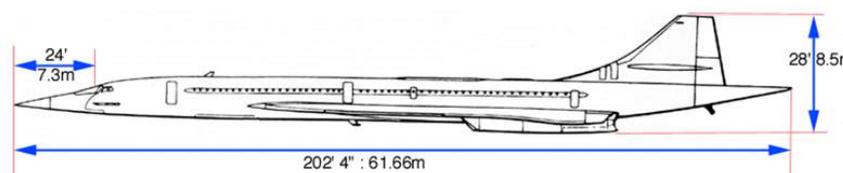
Partant du principe vérifié qu'un constructeur aéronautique part rarement d'une feuille blanche pour concevoir un nouvel avion mais utilise en général l'expérience acquise, Gérard Théron est revenu dans une première partie sur l'histoire du Concorde franco-britannique, le seul avion de transport supersonique ayant connu une carrière opérationnelle significative.

Le programme de développement du Concorde a duré de 1962 à 1976. Il a bénéficié de moyens quasiment illimités et a mobilisé les meilleures équipes aéronautiques européennes et les moyens d'essais et de calcul les plus puissants du moment. Il convient aussi de rappeler que

Fig. 2 - La masse au décollage de Concorde a augmenté entre le prototype et l'avion de série.



Mars 1969, prototype : 135 t, l = 51,8 m, e = 23,8 m



6 décembre 1973, série : 185,07 t, l = 61,66 m, e = 25,6 m

des évolutions techniques significatives ont eu lieu entre le prototype et l'appareil de série (figure 2) pour parvenir à l'objectif fixé : Paris New-York, soit 6 000 km avec 100 passagers, et qu'au moment de la mise en service les contraintes environnementales n'étaient pas ce qu'elles sont aujourd'hui ; Concorde était un avion très bruyant au décollage et à l'atterrissage et ne pouvait pas voler en supersonique au-dessus des terres habitées.

Le bilan de l'expérience Concorde a clairement démontré la difficulté du transport supersonique :

- les **treize avions produits** ont volé pendant **dix-sept ans** et **250 000 heures**, soit en moyenne 15 000 heures par appareil, ce qui est peu ;
- le bilan de masse au décollage indique que la masse à vide représentait 43 %, la masse de carburant autour de 48 % et la **charge utile** (passagers et bagages) **de 4 à 5 %** ;
- la consommation de carburant ramenée au nombre maximal de passagers s'établissait à environ 800 kg ; ce chiffre est à comparer à celui d'un avion subsonique moderne comme l'A32LR qui est de 120 kg ;
- les coûts d'exploitation étaient très élevés, en particulier les moteurs devaient être déposés toutes les 200 heures, c'est-à-dire avec une périodicité plus de dix fois plus faible que celle des moteurs des avions commerciaux actuels ;
- la température de peau dépassait 100°C en vol supersonique, ce qui amenait les structures, systèmes et équipements à leurs limites.

En 1976, Aérospatiale et BAC ont étudié un dérivé de Concorde, le Concorde B. Les progrès envisagés portaient sur :

- l'aérodynamique : finesse accrue de 12 à 13% au décollage, de 7% en croisière ;
- les moteurs : faible taux de dilution, concept 610-25 ;

# Vers un renouveau du transport supersonique ?

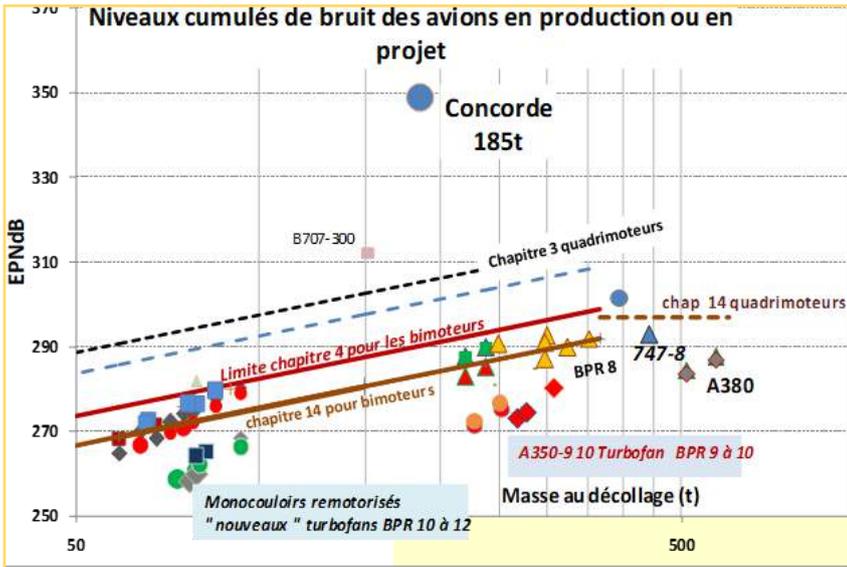


Fig. 3 - Niveaux de bruit en fonction de la masse.

**1. EPNdB pour** Effective perceived noise in decibels en anglais ; sert à exprimer le niveau effectif du bruit perçu et est utilisé pour la certification acoustique des avions commerciaux. Voir le site <https://www.acnusa.fr/aeroport/decibel-avion.html>

- l'introduction de matériaux composites.

Ces progrès auraient eu des répercussions sur la masse et au final auraient augmenté le rayon d'action de 900 km et légèrement réduit le bruit au décollage. La durée de développement du Concorde B aurait été de cinq ans. Ce concept a été abandonné.

L'aspect environnemental a fait l'objet d'un rappel pour démontrer que le bruit au décollage et à l'atterrissage d'un avion de transport supersonique est totalement inacceptable vis-à-vis des normes internationales actuelles fixées par l'OACI. La métrique utilisée est définie par un diagramme portant en abscisse la masse au décollage (en tonnes sur une échelle logarithmique) et en ordonnée le niveau sonore exprimé en EPNdB<sup>1</sup> (Effective Perceived Noise en dB, unité qui prend en

compte le niveau de bruit et le temps d'exposition sur chaque point de référence). La figure 3 montre pour chaque avion la somme des bruits cumulés sur les trois points de contrôle (décollage (latéral et survol) et approche.

Le Concorde avait un cumul de bruit sur les trois points de contrôle de 350 EPNdB (116.6 en moyenne), c'est-à-dire supérieur de 90 EPNdB à celui des bimoteurs les plus modernes transportant 50% de plus de passagers sur la même distance.

Pour être certifiable, chaque avion doit avoir un bruit cumulé inférieur à une limite qui change périodiquement pour traduire le durcissement de la norme environnementale (chapitre 14 actuellement).

Comme un écart de 30 dB par point correspond à un rapport de puissance acoustique de 1000, il est clair que Concorde serait aujourd'hui interdit de vol car beaucoup trop bruyant.

En outre, une nouvelle métrique vient d'être introduite par l'OACI pour la consommation de carburant et donc l'émission de gaz carbonique.

La consommation kilométrique par m<sup>2</sup> de plancher de Concorde est plus de quatre fois supérieure à celle d'un A320neo transportant 50% de passagers en plus sur la même distance (figure 4), 6 fois plus par passager. Concorde ne pourrait pas voler aujourd'hui en raison d'émissions excessives de CO<sub>2</sub> et de gaz à effet de serre.

Quant à la question de la possibilité de voler en supersonique au dessus des terres habitées, elle reste d'actualité même si certains pensent que ce serait possible mais à un nombre de Mach ne dépassant pas 1,1.

Un second rappel a porté sur la formule de Bréguet-Leduc afin de mettre en évidence les paramètres physiques sur lesquels il est possible d'agir pour accroître les performances d'un avion. Cette formule simplifiée est établie en partant du double équilibre en croisière : portance = poids, traînée = poussée.

Elle s'écrit :

$$R = (vitesse \times finesse) / (g \times consommation \text{ spécifique}) \times \ln(1 + M_c/M_a)$$

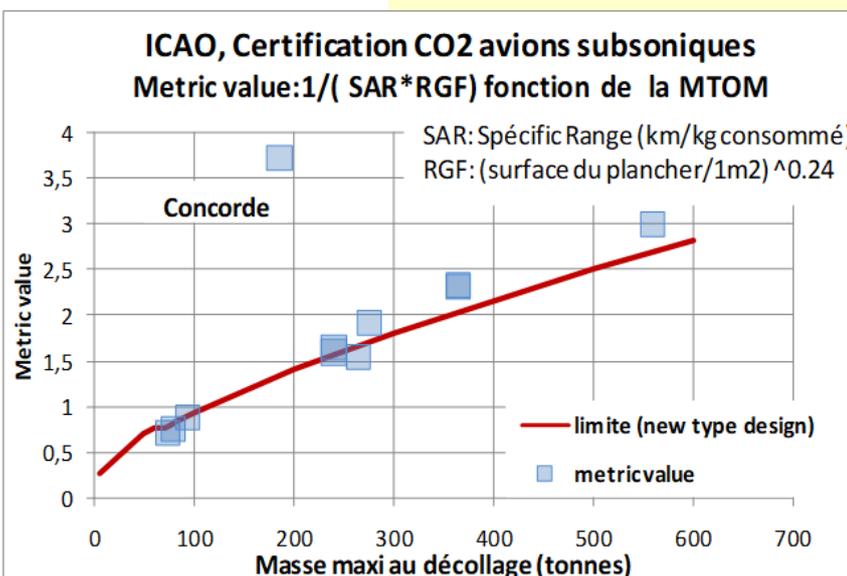


Fig. 4 - Une nouvelle métrique internationale pour la consommation de carburant.

# Vers un renouveau du transport supersonique ?

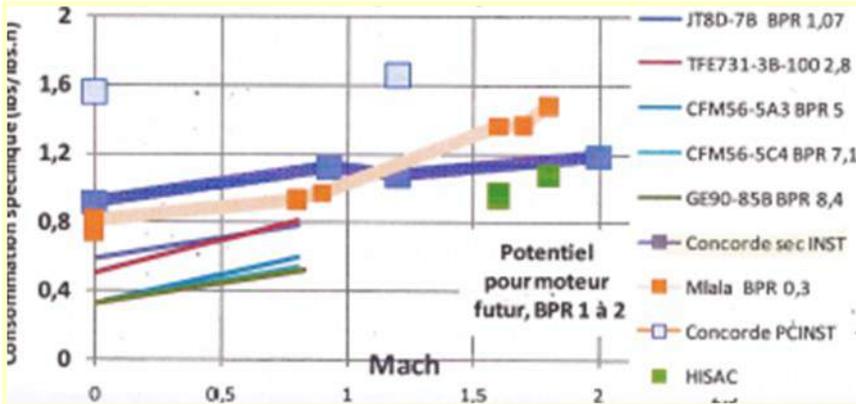


Fig. 5 - Exemples de consommation spécifique de moteurs.

où R est la distance franchissable, Mc la masse de carburant consommée et Ma, la masse à l'atterrissage.

Les grandeurs sur lesquelles il est possible d'intervenir sont donc :

- la finesse f, rapport de la portance à la traînée ; la finesse des avions commerciaux subsoniques actuels est de 15 (régionaux) à 21 (longs courriers) ; les moyens de calcul modernes permettent d'optimiser, « pour une forme en plan », la finesse sans toutefois la révolutionner ; la finesse de Concorde était de 7.1 à 7.3 en supersonique ;
- la consommation spécifique qui varie avec la vitesse et dépend du rendement propulsif, qui augmente avec le taux de dilution avec des gains qui diminuent fortement avec la vitesse, et du rendement thermique des moteurs (figure 5).

De 1976 aux années 1990, Aérospatiale a maintenu une petite équipe dont l'objectif était de déterminer les caractéristiques et les performances potentielles d'un avion supersonique tenant compte des

progrès les plus récents en aérodynamique, propulsion et matériaux, ainsi que de l'évolution des exigences en matière de certification. Les avant-projets de cet ATSF (Avion de Transport Supersonique Futur) ont porté sur un avion de taille supérieure à Concorde (250 passagers) caractérisé par une augmentation significative de l'envergure et une diminution relative du maître-couple du fuselage par rapport à la surface de la voilure, l'amélioration de la finesse visant 40% (f voisine de 10). La recherche d'un système propulsif alliant gain de bruit et performance installée a été menée avec Rolls-Royce (concept Tandem Fan system) et avec Snecma (concept MCV99 Mid Tandem Fan system). Le développement d'un tel moteur aurait pris quinze ans et nécessité de lourds investissements. Ces moteurs auraient été pénalisés en croisière par rapport à un moteur classique et n'auraient au mieux diminué le bruit au décollage que de 15 à 20 dB, le ramenant à un niveau encore largement supérieur à la norme Chapitre 14 récente. En conséquence les motoristes ont interrompu les études de faisabilité.

Devant l'impossibilité aussi bien technique qu'économique et environnementale de donner un successeur à Concorde, des promoteurs d'avion supersonique ont imaginé que l'avion d'affaires pourrait constituer un marché. Une clientèle fortunée pourrait en effet y trouver un intérêt à condition que le temps de vol soit réduit pour un rayon d'action supérieur à 6000 km. Mais les avions d'affaires les plus modernes possèdent un rayon d'action supérieur à 10000 km et satisfont les exigences environnementales récentes tant pour le bruit que pour la nouvelle métrique CO<sub>2</sub>.

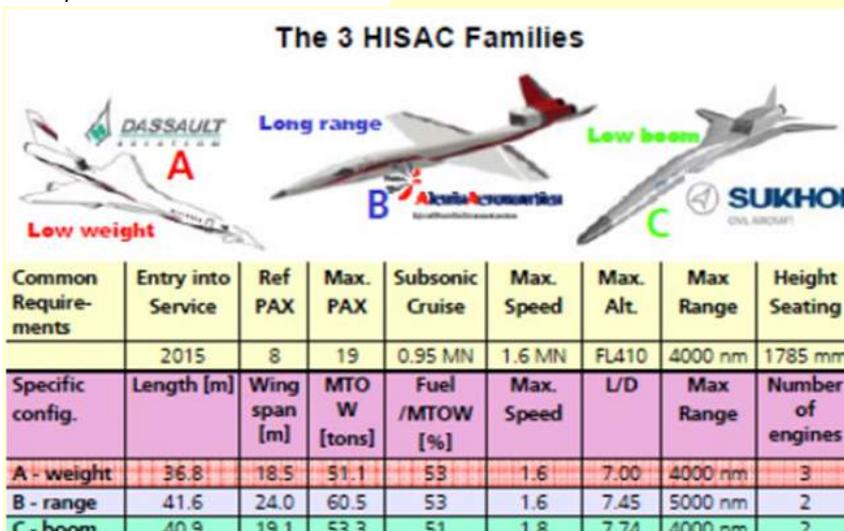
Le programme de recherche européen intégré HISAC (High Speed AirCRAFT), qui s'est déroulé de 2004 à 2008, s'est intéressé à trois concepts spécialisés (figure 6) : le premier « low weight » (leader Dassault Aviation), le second « long range » (leader Alenia) et le troisième « low boom » (leader Sukhoi). Le programme a conclu à l'impossibilité de satisfaire simultanément les diverses contraintes et n'a pas eu de suite sur un même avion certifiable.

## OUVRAGES

**Concorde, La légende volante** par Alain Ernoult, éditeur Du May, 192 pages, 10 décembre 2002, EAN13 : 978.2.84102.079.9.

**Concorde, le dernier été** par Peter Marlow, éditeur Thames Hudson, 144 pages, 5 octobre 2006, EAN 978.2.87811.283.2.

Figure 6 - Le programme européen HISAC



## Vers un renouveau du transport supersonique ?



Fig. 7 - Dernier projet AS2 d'Aerion ; 4200nm (7700km) à Mach 1.4, masse au décollage de 60.3 tonnes.

### OUVRAGES

**Pilote d'essais, Mémoires 2** par André Turcat, éditeur Le Cherche Midi, 5 mars 2019, EAN13 : 978.2.74911.374.6.

**Concorde passion** par Philippe Lemaire et Xavier Deregél, édition bilingue français-anglais, éditeur LBM, 191 pages, 01 décembre 2009, EAN13 : 978.2.91534.773.9.

Gérard Théron a ensuite proposé une synthèse des projets faisant l'objet d'une publicité : Aerion, Spike et Boom. Ces différents projets ont évolué dans le temps sur les points suivants :

- masse au décollage, généralement en croissance ;
- dates de certification et d'entrée en service, toujours reculées ;
- rayon d'action ;
- coût de développement et prix, en augmentation ;
- nombre et types de moteurs.

La dernière version de l'Aerion (figure 7), l'AS2, pourrait transporter 8 à 12 passagers à Mach 1,4 à partir de 2025 Il serait propulsé par trois moteurs ; General Elec-

Aerion est d'utiliser une aile droite laminaire.

L'orateur a rappelé que le maintien de la laminarité pourrait diminuer la traînée au mieux de 6 à 8%, qu'elle a fait l'objet d'expériences en vol au cours des dernières décennies et qu'elle impose une surface parfaitement propre, ce qui est très difficile à obtenir en pratique.

Le survol des terres habitées se ferait à un nombre de Mach inférieur à 1,2 avec une réduction du rayon d'action limitant les gains de temps de 15 à 25%.

Le Spike S-512 vise le transport de 12 à 18 passagers (figure 8), 6200 NM, avec une vitesse de croisière comprise entre Mach 1,6 et Mach 1,8, une masse au décollage de 52.2 tonnes. Les moteurs, qui nécessiteraient des entrées d'air et tuyères variables, ne sont pas connus de même que la date de certification.

Le Boom (figure 9) est un projet ambitieux visant à transporter 45 à 50 passagers sur 17700 km à une vitesse de Mach 2,2. Une escale est prévue pour les routes supérieures à 8850 km ! Il s'agit d'une architecture assez comparable à celle de Concorde, avec « trois moteurs à taux de dilution modéré et des géométries variables d'entrées d'air et de tuyères et il devrait satisfaire le chapitre 14 pour le bruit ». Un démonstrateur à échelle 1/3, le Baby Boom, dont le présentateur ne voit pas l'intérêt technique, est annoncé pour fin 2018, motorisé par 3 J85-21.

Il s'est ensuite livré à des synthèses portant sur les différentes caractéristiques des avions de transport supersoniques proposés, en s'appuyant sur les connaissances du passé et sur les projets récents :

- propulsion : il ressort qu'aucune architecture de moteur (taux de dilution, taux de compression, ...) ne permet de satisfaire la globalité des exigences ; indépendamment du bruit aéroportuaire, la consommation spécifique pourrait au mieux varier de 0,85 kg/daN.h à Mach 1,4 à 1,1 kg/daN.h à Mach 2,2 ;
- masses : une comparaison des masses maximales au décollage (MTOW ou MTOM) et des masses à vide en ordre d'exploitation, rapportées à la surface de la cabine, fait craindre une large sous-évaluation pour l'Aerion et excès-

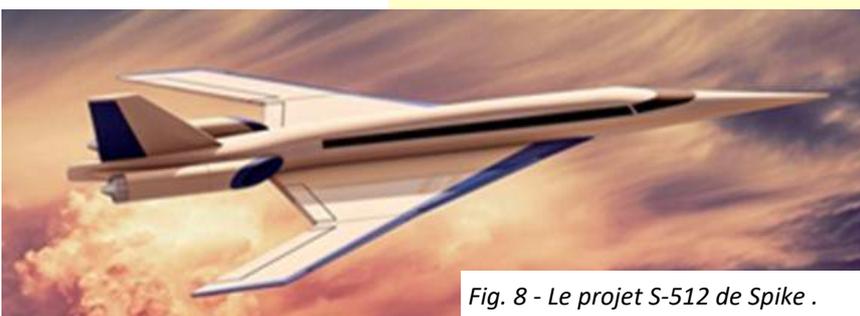


Fig. 8 - Le projet S-512 de Spike .

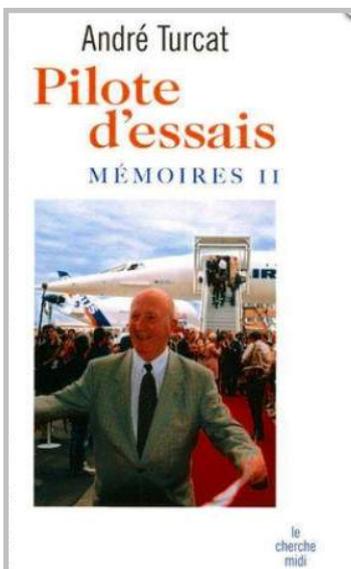
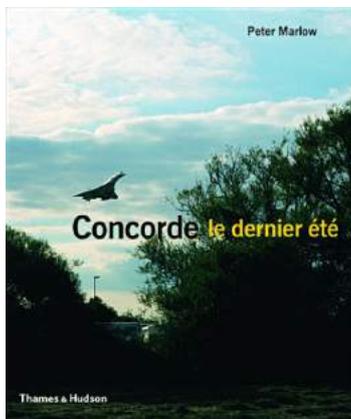


Fig. 9 - Les projets Boom et Baby Boom.



tric, associé récemment à Aerion, reste prudent sur sa capacité à développer le moteur. Une particularité des projets

## Vers un renouveau du transport supersonique ?



sive pour les autres projets ;

- aérodynamique : les caractéristiques géométriques ne permettent pas d'espérer un gain important de finesse par rapport à Concorde ;
- rayon d'action résultant : au mieux, il sera difficilement supérieur à celui de Concorde, voire inférieur si des marges doivent être prises en compte pour compenser les aléas de développement ; il s'est avéré que la masse de l'avion de série est généralement supérieure à celle du prototype, comme illustré par la figure 1 ;
- temps de développement : il faut tenir compte que la configuration de l'avion doit être impérativement figée à la fin de la période de pré-développement (environ 5 à 6 ans avant la livraison) pour permettre le développement de chaque partie de l'avion par les divers sous-traitants et équipementiers et de garantir les performances et date de livraison aux acheteurs potentiels ; pour cela l'avionneur doit disposer d'équipes compétentes dans tous les domaines de définition de l'avion ; les systèmes propulsifs, contributeurs importants à l'architecture générale et leurs performances, doivent quant à eux être définis dès le début du pré-développement ; les nouveaux programmes manquent de maturité sur tous ces points.

L'échec commercial de Concorde s'explique aisément par deux raisons : d'une part, le bruit au décollage et à l'atterrissage ainsi que le bang supersonique posaient déjà problème, d'autre part, des coûts d'exploitation prohibitifs et en particulier une consommation par siège exces-

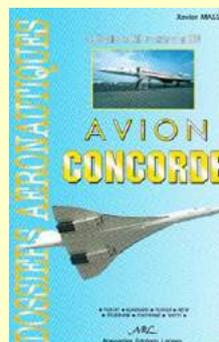
sive. Les avant-projets qui ont succédé à Concorde ont identifié des voies d'amélioration sans que le dilemme « performance-bruit » puisse être résolu. La taille des bizjets supersoniques, pour un nombre de passagers compris entre 8 et 55 et un nombre de Mach en croisière de 1,4 à 2,2, ne permet pas des gains significatifs sur l'aérodynamique, le bruit, la consommation spécifique et les masses. Les objectifs déclarés ne pourront alors pas être atteints.

Homme de convictions nourries par une longue expérience, Gérard Théron a proposé une synthèse très argumentée des avions de transport supersoniques depuis Concorde jusqu'aux projets les plus récents. En résumé la vitesse visée de l'avion et ses conséquences sur ses caractéristiques principales rendent improbables le développement d'un nouveau Concorde ou de projets d'avions supersoniques à grand rayon d'action ayant des performances environnementales acceptables. Comme dans de nombreux secteurs économiques, il faudra de plus en plus croiser les possibilités techniques avec des normes générales de plus en plus contraignantes pour atteindre les nécessaires objectifs de sécurité et de performance.

PK



© Air France



OUVRAGE :

**Avion Concorde : de l'évocation en 1943 au dernier vol en 2003**  
par Xavier Massé, Préface de Henri Gilles Fournier (pilote du dernier vol d'un Concorde Air France), Nouvelles Éditions Latines (NEL), 217 pages, 2004, ISBN 2.7233.2045.6.

Par **Christophe Bonhomme** (*expert sénior propulsion au CNES*)  
et **Emmanuel Edeline** (*ArianeGroup*)

**Mardi 18 avril 2018, Salle de l'Espace du CNES**

(Conférence organisée par la commission technique Propulsion de 3AF avec le groupe Ile-de-France)

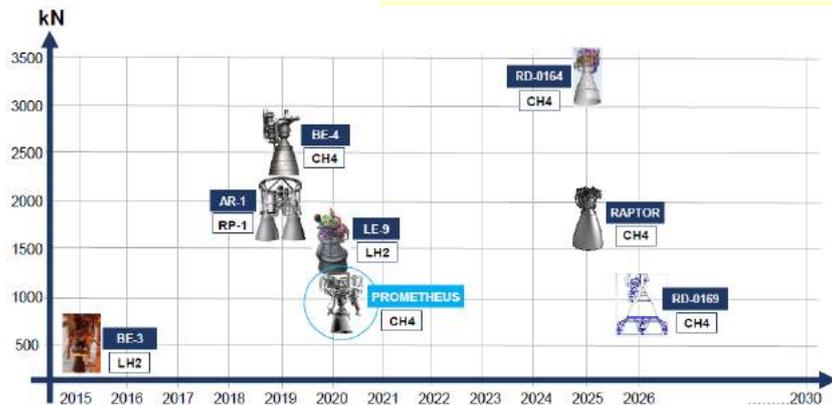


Fig. 1 - Les nouveaux moteurs à ergols liquides en développement (hors moteurs chinois).

Dans une première partie de la présentation, Christophe Bonhomme a présenté la vision du CNES concernant le développement des lanceurs futurs, au-delà d'Ariane 6. On observe en effet que toutes les zones géographiques du monde possèdent maintenant leurs propres systèmes de lancement et que la concurrence augmente ; selon le document FAA de février 2018, Proton et Falcon sont en particulier compétitifs. L'Europe a bâti sa stratégie actuelle d'accès indépendant à l'espace sur le triptyque Vega, Soyouz et Ariane 5/6 et prépare déjà le développement de nouveaux moteurs pour les lanceurs qui succéderont à Ariane 6 (figure 1).

On constate que tous ces moteurs utilisent l'oxygène liquide comme comburant et que le combustible est soit le kérosène pour fusée (RP1 aux Etats-Unis), soit le

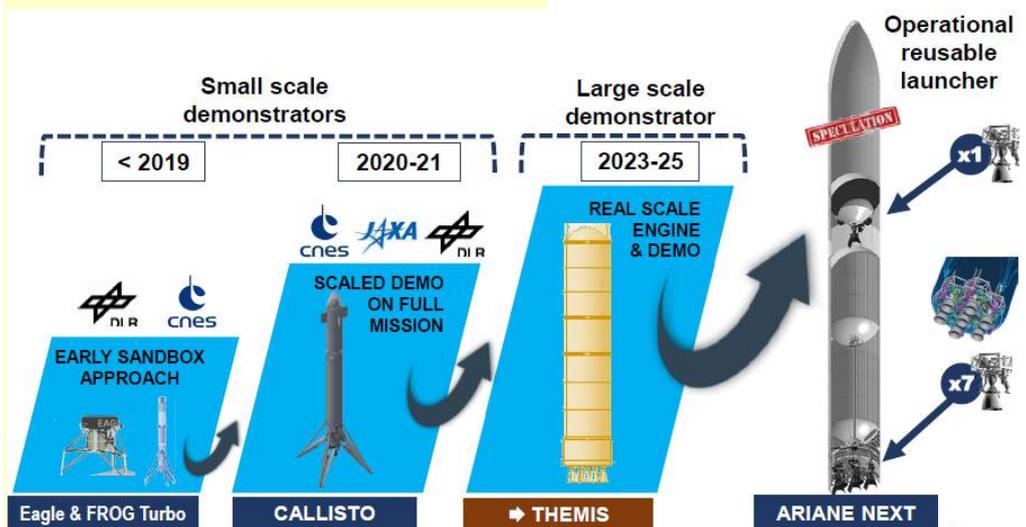
méthane liquide, soit l'hydrogène liquide. La gamme de poussée s'échelonne de 500 à 3500 kN, Prometheus visant 1000 kN.

Pour atteindre les objectifs de performance et de coût pour Prometheus, différents leviers devront être activés :

- la standardisation pour les moteurs et les réservoirs en vue d'économies d'échelle : par exemple le moteur du deuxième étage serait une version spécifique des moteurs du premier étage ;
- la réutilisation des moteurs, à l'image de ce que fait actuellement Space X pour le Falcon 9, ce qui est une source de flexibilité et de réduction des coûts ;
- une nouvelle philosophie industrielle de fabrication en série, agile et collaborative (Industrie 4.0) ;
- l'utilisation intensive de nouvelles technologies : matériaux composites, LOX-LCH4, fabrication additive, ...

Cette approche reposera sur des étapes de démonstration de complexité croissante, illustrées par la figure 2, et débouchant sur un nouveau lanceur appelé Ariane Next. Après cette introduction, Emmanuel Edeline a détaillé les technologies du futur moteur Prometheus. Ce moteur vise une propulsion à très bas coût (figure 3).

Fig. 2 - Les étapes menant à Ariane Next.



# PROMETHEUS : le futur de la propulsion liquide fusée

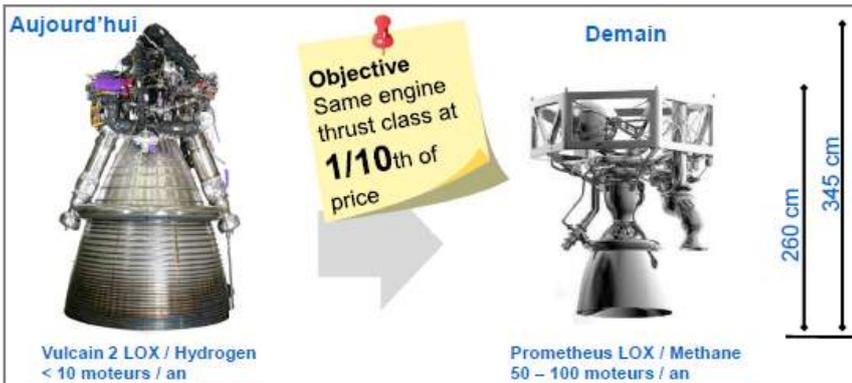


Fig. 3 - Prometheus, promoteur de la propulsion bas coût.

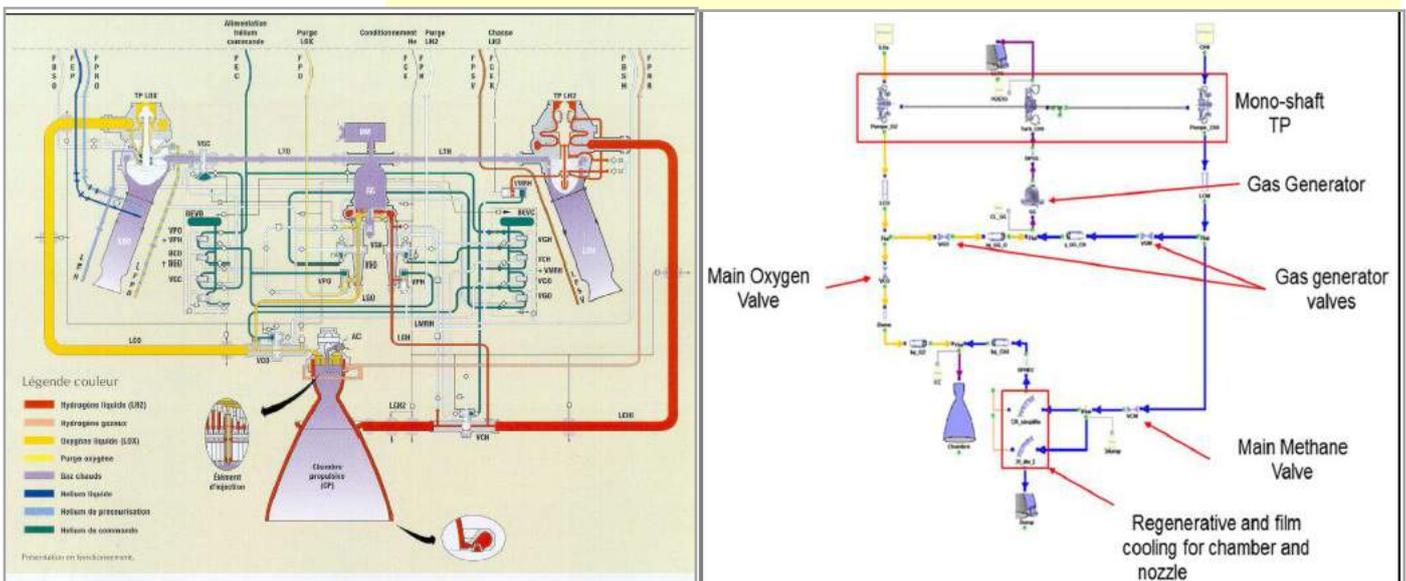
Par comparaison le moteur Vulcain 2 (LOX-LH2, Ariane 5 et 6) est produit à moins de dix exemplaires par an alors que le moteur Prometheus, d'une poussée proche de celle de Vulcain 2, vise un prix unitaire réduit d'un facteur dix et une production de 50 à 100 exemplaires par an (1000 kN pour 1 Meuro). Pour atteindre cet objectif ambitieux, les choix principaux portent sur :

- l'utilisation du méthane liquide, facteur de simplification de toute la chaîne industrielle ;
- une poussée limitée à 1000 kN ;
- un concept universel et flexible ;
- la réutilisation.

Ce défi sera relevé dans le cadre d'une approche agile et frugale s'inspirant de l'industrie automobile et correspondant à des évolutions de pensée et de pratique partagées par tous les acteurs du projet, agences et industriels.

Le moteur a été grandement simplifié comme le prouve la figure 4, où sont comparées les architectures système de Vulcain et de Prometheus.

Fig. 4 - Architectures comparées de Vulcain (gauche) et de Prometheus (droite).



Simplicité et robustesse reposent sur les choix suivants :

- cycle à générateur de gaz ;
- pression de chambre modérée (110 bar) ; l'impulsion spécifique sera de 320 s au sol et de 360 s dans le vide ;
- turbopompe mono-arbre oxygène-méthane ;
- moteur connecté, la commande et la régulation seront électriques, les diagnostics existeront dans toutes les phases de vie du moteur, la connexion aura lieu avec les environnements sol et vol ;
- le pilotage électrique sera réalisé par deux vannes pour le générateur de gaz et par deux vannes pour le rapport de mélange moteur, ce qui simplifiera la qualification.

La fabrication se fera dans une usine adoptant l'approche « green field » d'optimisation industrielle. La définition du moteur sera le résultat de cette optimisation. Beaucoup d'éléments du moteur seront produits par fabrication additive (carter pompe, turbine, générateur de gaz, ...).

Le développement se veut agile et frugal et s'inspire de l'innovation « jugaad » (mot populaire hindi dont la traduction pourrait être « débrouillardise » ; Renault et SNCF utilisent déjà le jugaad) et de l'approche spiralée. Deux exemples ont été donnés : la turbopompe et le générateur de gaz (essayé entre 10 et 150 % au banc P8 de Lampoldshausen).

Concernant le planning de développement de Prometheus, il est défini jusqu'en

# PROMETHEUS : le futur de la propulsion liquide fusée



Fig. 5 - Les principales étapes de Prometheus.

2020, année au cours de laquelle devraient avoir lieu les premiers essais du moteur (figure 5).

Les travaux préliminaires ont été financés par le CNES jusqu'en 2016 ; à partir de 2017 Prometheus fait partie du programme FLPP de l'ESA. Des essais d'une chambre de combustion Romeo de 35 tf de poussée ont déjà eu lieu au banc P3.2 du DLR à Lampoldshausen.

Les questions suivant la conférence ont été fort nombreuses. En voici un résumé synthétique, questions et réponses.

- **Quelle est l'alimentation électrique ?** Aujourd'hui il est prévu une batterie, demain peut-être un système type APU.
- **Ordinateurs de bord et lanceurs en fagot ?** Chaque moteur aura son calculateur intégré, ces calculateurs seront reliés au calculateur central de l'étage.
- **Quel est l'objectif de réutilisation et quel est son impact sur le coût de lancement ?** La réutilisation suppose un certain nombre de missions. Le gain économique est atteint après trois à cinq missions.
- **Pourquoi avoir choisi le méthane et non le méthanol ?** Le méthanol est handicapé par une plus faible impulsion spécifique (la molécule de méthanol comporte un atome d'oxygène). Une comparaison a été faite entre méthane et kérosène. Le couple LOX-LCH4 délivre une impulsion spécifique intermédiaire entre celles des couples LOX-Kérosène et LOX-LH2 et simplifie grandement le moteur. Il n'existe pas de filière de kérosène fusée en Europe, il faudra développer une filière méthane liquide.
- **Le moteur Merlin de Space X a-t-il inspiré Prometheus ?** L'inspiration est

plutôt venue du Viking qui vole encore sous sa version indienne Vikas après avoir propulsé Ariane 1 à 4.

- **Pourquoi avoir choisi 1000 kN pour Prometheus ?** Il a été envisagé un moteur de 7000 kN, ce qui aurait conduit à une faible cadence de fabrication et nécessiterait de plus grosses machines de fabrication additive. Le choix de 1000 kN est le meilleur pour la standardisation des moteurs des étages inférieurs et de celui de l'étage supérieur, ainsi que pour la récupération : le retour au sol d'un étage inférieur utiliserait un moteur d'une baie de sept moteurs, fonctionnant à 30 % ; un moteur de 7000 kN devrait fonctionner à 4 %, ce qui est très difficile voire impossible à réaliser.
- **Pourquoi ne pas réutiliser les gaz de refroidissement de la tuyère ?** Le cycle bleed du méthane ne peut atteindre une poussée de 1000 kN.
- **Refroidissement par l'oxygène gazeux ?** Les Russes le font sur certains moteurs, cela pose des problèmes de matériaux et la conception est moins robuste.
- **Que pensez-vous du Raptor de Space X ?** Il s'agit d'un moteur complexe utilisant un cycle à combustion étagée et une pression de chambre élevée (300 bar), dont la réalisation sera difficile et le coût élevé.

L'existence de Prometheus était connue dans ses grandes lignes dans la presse spécialisée. Merci à Christophe Bonhomme et à Emmanuel Edeline d'en avoir détaillé la stratégie, les détails technologiques et le planning. Il est particulièrement réconfortant de constater que l'Europe ne reste pas inactive dans la préparation des futurs lanceurs spatiaux.

PK



Fig. 1 - L'analyse IPSOS des motivations pour le vol suborbital.

1. IAA : International Academy of Astronautics.

Christophe Bonnal et Jean-Luc Wibaux se sont livrés à un duo. En tant qu'agence nationale, le CNES n'investit pas d'argent dans le tourisme spatial mais possède un rôle de certification et veille à la synergie entre les activités spatiales conventionnelles et le tourisme spatial. Christophe Bonnal a en outre présidé dans le passé la commission tourisme spatial de l'IAA<sup>1</sup>, a édité le livre blanc IAA sur le sujet et organisé deux congrès sur l'Accès Privé à l'Espace. Jean-Luc Wibaux, représentant exclusif de Virgin Galactic en France, partage quant à lui une passion pour le tourisme spatial et un intérêt pour l'aspect business de cette activité.

L'accès privé à l'Espace s'est développé depuis une quinzaine d'années et le tourisme spatial est l'une de ses composantes. Il existe deux familles d'accès à l'espace.

- L'accès orbital. L'altitude de l'orbite est au minimum de 200 km et la durée du séjour en orbite d'une semaine. L'offre actuelle est limitée à Soyuz-TM mais 3 à 4 véhicules concurrents sont en développement aux États-Unis.
- L'accès suborbital. Il s'agit d'atteindre une altitude minimale de 100 km par une trajectoire balistique, ce qui permet de rester environ 4 minutes en apesanteur, lors d'une mission de

deux heures. 100 km est une altitude conventionnelle non officielle définissant le début de l'Espace (ligne de Karman).

Ces deux modes d'accès à l'espace correspondent à des dépenses énergétiques très différentes, respectivement 34 MJ/kg et 1 MJ/kg. Le vol spatial d'astronautes non-professionnels a été envisagé depuis plus de trente ans. Quelques candidats ont volé (Jake Garn, Bill Nelson, Tohohiro Akiyima) et de nombreux projets ont été étudiés sans pour autant voir le jour (Rockwell 74 passagers module, dérivé du Space Shuttle, Astrium Space Hotel Complex). La demande pour le tourisme spatial a toujours été élevée : en 1997, 100 000 personnes par an auraient été prêtes à payer 100 000 \$ pour un séjour en orbite mais à cette époque aucune solution crédible n'existait pour faire face à cette demande, seulement quelques projets ambitieux tels Astros d'Astrium ou Kankoh de KHI. La situation n'a guère changé, l'accès orbital de masse reste hors de portée. Par contre, on a assisté à la création de plusieurs agences de voyage spatial comme Space Adventures et Scandinavian Connection to Space, ainsi qu'à la multiplication d'activités plus ou moins liées au spatial : passage en centrifugeuse, vol sur avions supersoniques, vol sur avions 0 g, ... L'offre orbitale actuelle reste limitée à Soyuz mais est contrainte par la cadence de production et les besoins d'entraînement, ce qui fait qu'à ce jour, seuls 7 participants privés sont allés en orbite.

L'accès privé de masse à l'Espace passera obligatoirement par les vols suborbitaux. Mais quelles sont les motivations poussant un terrien à tenter un vol suborbital ?

- Du côté positif, c'est le rêve qui l'emporte : quel enfant n'a pas rêvé de devenir aviateur ou mieux astronaute ? C'est aussi la possibilité d'expérimenter de nouvelles sensations (apesanteur), d'avoir une vision de la Terre (conscience écologique), ...
- Du côté business, les leviers sont multiples : il s'agit pour certains de déve-

# Le tourisme spatial : mythe ou réalité ?

## Concours Ansari X-Prize : le Space ShipOne de Scaled Composites

### Principe :

- . Petit avion fusée Space Ship 1 : 1 pilote + 2 gueuses
- . Avion porteur dédié White Knight
- . Largage à 16 km d'altitude
- . Allumage du moteur Space Ship 1 pendant 80 s ⇒ Mach 3
- . Courbe en cloche jusqu'à 100 km
- . Financement par Paul Allen (Microsoft)



Fig. 2 - Le SpaceShip One.

opper une nouvelle attraction genre Luna Park, pour d'autres de satisfaire une pulsion type shoot d'adrénaline ou « Étoffe des héros », pour les plus fortunés d'affirmer son rang social, ce qui relève d'un snobisme. Une sérieuse analyse a été menée en 2011 pour Astrium (figure 1).

La robustesse du marché dépend fondamentalement des motivations :

- la demande semble importante de prime abord mais n'est pas totalement comprise ;
- certains la croient crédible en prenant pour comparaison les activités de luxe qui représentent 100 Md\$ et 20 millions de touristes par an ; par conséquent, ils supposent l'existence d'une classe de gens fortunés susceptibles de faire émerger le marché du tourisme spatial suborbital.

Le premier concours pour atteindre les 100 km d'altitude a été l'Ansari X-Prize proposé en 1996 par Peter Diamandis. Il

Fig. 3 - Le New Shepard.



s'agissait d'amener trois passagers à 100 km, de ramener le véhicule et les passagers intacts, de rééditer un vol dans les semaines suivantes en se resservant de 90% du véhicule et en utilisant seulement un financement privé. Le prix était de 10 M\$. Il y a eu 26 concurrents déclarés, plus ou moins sérieux Le gagnant du prix Ansari X a été le SpaceShip One de Scaled Composites, financé par Paul Allen, l'un des fondateurs de Microsoft. Ce petit avion-fusée de 3,6 t, largué par l'avion porteur White Knight et propulsé par un moteur-fusée hybride fonctionnant pendant 80 s, a dépassé 100 km avec un pilote et deux gueuses simulant des passagers (figure 2). A la suite du succès de SpaceShip One, Richard Branson (Virgin Galactic) a commandé cinq exemplaires du SpaceShip Two, dont le premier exemplaire a été accidenté le 31 octobre 2014. Virgin Galactic a depuis trouvé de nombreux partenaires, dont un fond saoudien pour 350 M\$.

La plupart des projets du prix Ansari X n'ont pas connu de suite. Seul le développement du SpaceShip s'est poursuivi par le SpaceShip Two. Le New Shepard de Blue Origin, qui n'était pas candidat à l'Ansari X-Prize, a connu des avancées. Il s'agit d'un monoétage propulsé par un moteur-fusée BE3 utilisant LOX et LH<sub>2</sub> et développant 400 kN (figure 3). Le retour de la cabine se fait par parachute. Le lanceur a fait l'objet de 8 lancements réussis, récupération comprise, il pourrait être le premier à embarquer un passager dans les prochains mois.

Si l'on s'intéresse aux aspects techniques concernant les véhicules en projet ou en développement, on constate qu'il y a une grande variété de concepts que l'on peut regrouper en quatre familles :

- les monoétages aérolargués ;
- les véhicules à décollages verticaux ou horizontaux ;
- les véhicules utilisant pour le retour des ailes, des fusées ou des parachutes ;
- la propulsion fusée éventuellement assistée par turboréacteurs.

Le nombre de passagers ne dépasse pas 8. De nombreuses questions restent aujourd'hui sans réponse, notamment les problèmes de transition, les anomalies redoutées, le niveau de réutilisation et les utili-

# Le tourisme spatial : mythe ou réalité ?



Fig. 4 - Le Spacehub de Bordeaux-Mérignac vise large.

## 2. Man rated : acceptable pour un usage humain.

sations duales. La perception des passagers sera essentielle.

La propulsion fusée paraît selon les orateurs être obligatoire, peut être assistée dans certaines phases de vol par une propulsion aérobique. En effet, une poussée de l'ordre de 400 kN est requise pour accélérer le véhicule jusqu'à Mach 3 à 4 dans la phase ascendante. Les technologies disponibles devront être adaptées aux besoins de modulation de poussée, de réutilisation, de sécurité et de faible impact environnemental. Toutes les technologies connues ont été proposées : propulsion solide bas coût, propulsion par ergols liquides, propulsion hybride.

Il faudra aussi penser aux installations sol. Les critères de sélection de ces ports spatiaux seront la sécurité, l'intérêt de la zone survolée, les contraintes météorologiques et celles associées au trafic aérien. Il existe des antagonismes entre ces différents critères. De nombreux projets de ports spatiaux sont à l'étude dans le monde, aux statuts juridiques flous. Pour la France est né le Spacehub de Bordeaux-Mérignac qui constituerait le premier parc européen dédié au tourisme spatial. Ce parc se décompose en un parc à thème (Space Odyssée), un Space Port et un Space Campus. Space Odyssée est prévu pour accueillir de nombreux équipements spécialisés et pourrait être réalisé en une vingtaine d'années avec un budget d'une centaine de millions d'euros. Space Port comportera tous les ingrédients de formation et d'entraînement préparant au vol suborbital, Space Port et Space Campus seront dédiés aux marchés professionnels. Spacehub se situerait en bordure de

l'aéroport international, côté Saint-Jean d'Illac.

Le tourisme spatial commencera à l'évidence par des vols suborbitaux. Qu'en est-il de son extension au séjour orbital ? L'accès à l'orbite suppose la disponibilité de capsules spatiales et de lanceurs adaptés. Il existe des développements de Taxis spatiaux chez les constructeurs américains (SpaceX Dragon V2, Blue Origin, Boeing Space Liner, Sierra Nevada Dream Chaser), russes (PPTS Federatsia) et chinois (Shenzhou). Les lanceurs (Space X, Blue Origin, Ariane) devront être « man rated »<sup>2</sup>.

Des moyens d'accueil en orbite des touristes spatiaux ont commencé à être étudiés : Bigelow Sundancer et B330 (figure 5), Stations Aurora, Excalibur et Almaz, Project Energia ; les modules Bigelow ont été qualifiés au sol. Les aspects médicaux, physiologiques et ergonomiques imposent d'estimer à leur juste valeur les facteurs de risque pour les passagers, les contraintes physiologiques et psychologiques acceptables, les risques médicaux et les exigences d'habitabilité (combinaisons de vol). Il faudra probablement procéder à une sélection des candidats avec des installations au sol dédiées. Des critères de sélection semblables à ceux mis en œuvre pour les spationautes professionnels mais moins sévères devront être définis par les organismes officiels comme la FAA et l'EASA.

Un énorme problème a trait en outre à la fiabilité, à la sécurité et aux risques encourus par les touristes spatiaux (mission avortée, tolérances aux pannes, moyens de retour des passagers). Un progrès significatif doit être réalisé en matière de propulsion. Les statistiques pour les moteurs-fusées à propergol solide ou à ergols liquides démontrent que la probabilité d'une panne moteur est de 1 à 7 chances sur 100, la probabilité d'une explosion de 1 chance sur 1000 ; il n'existe pas de statistique sur les moteurs-fusées hybrides. Ces données posent la question de la tolérance du tourisme spatial aux accidents : un accident mortel peut-il tuer le tourisme spatial ? A priori non si l'on prend pour exemple l'aviation militaire ou commerciale. L'accident du SpaceShip Two du 31 octobre 2014 (un pilote décédé, un autre grièvement blessé) n'a pas empêché la reprise des vols le 8 septem-

# Le tourisme spatial : mythe ou réalité ?

## ⇒ Préparation de l'accès à l'orbite

- Il faut des hôtels : quelques initiatives (1/2)
  - . Bigelow Sundancer et B-330

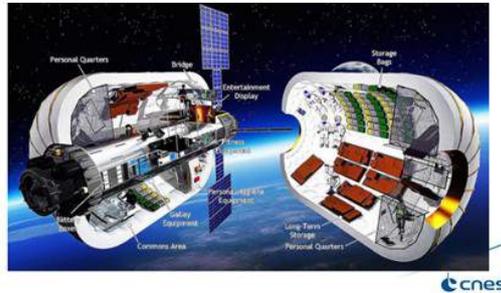


Fig. 5 - Des projets pour le séjour de touristes en orbite.

bre 2016. Les risques encourus par le tourisme spatial débouchent sur des interrogations concernant les aspects juridiques, d'assurance et réglementaires. Ce sont des sujets difficiles encore mal maîtrisés qu'il conviendra de clarifier avant le début des opérations à grande échelle. Le rôle de la FAA aux États-Unis et de l'EASA en Europe sera déterminant. A rappeler l'existence d'un groupe de travail CNES-DGAC sur ces sujets. Le tourisme spatial peut ouvrir la porte à des applications secondaires telles que les vols 0 g de longue durée, la surveillance globale de la Terre, le vol express longue distance mais qui font déjà l'objet de projets spécialisés. Un point par contre plus positif est la capacité de mobiliser les jeunes générations autour d'une vision d'avenir.

En conclusion, le tourisme spatial pourrait se développer sous sa forme suborbitale dans un proche avenir, une fois surmontés les écueils mis en évidence sur les plans techniques et législatifs. Dans ce mouvement, qui sera principalement le fait du secteur privé, les agences se réservant les rôles de certification et d'élaboration des lois, de lourds investissements seront nécessaires. Pour le tourisme spatial orbital, il faudra sans doute attendre une prochaine génération.

L'Accès Privé à l'Espace va probablement se concrétiser dans les prochaines années grâce à des entreprises offrant à une clientèle plutôt fortunée la possibilité de réaliser un vol suborbital. Des progrès sont indispensables en matière de propulsion pour accroître la fiabilité des lanceurs ou véhicules et assurer la meilleure sécurité aux passagers. Le cadre régissant ces aspects devra être impérativement clarifié

avant que le vol suborbital devienne une activité à caractère industriel. Les progrès attendus peuvent en outre profiter aux activités spatiales traditionnelles, voire déboucher sur de nouvelles applications.

Des questions ont été posées à l'issue de la présentation. Les plus pertinentes ont été les suivantes.

- **Pourquoi le choix de Mérignac pour le Spacehub ?** Mérignac est proche de la mer et accueille déjà l'Airbus 0 g, Istres a aussi été envisagé.
- **Quel impact de l'activité suborbitale sur l'environnement ?** La propulsion par propergol solide est la plus polluante, la plus propre repose sur le couple LOX-LH<sub>2</sub> (New Shepard de Blue Origin).

Les deux orateurs, Christophe Bonnal et Jean-Luc Wibaux, ont livré une conférence très complète abordant tous les aspects du tourisme spatial, qu'ils en soient chaleureusement remerciés.

PK

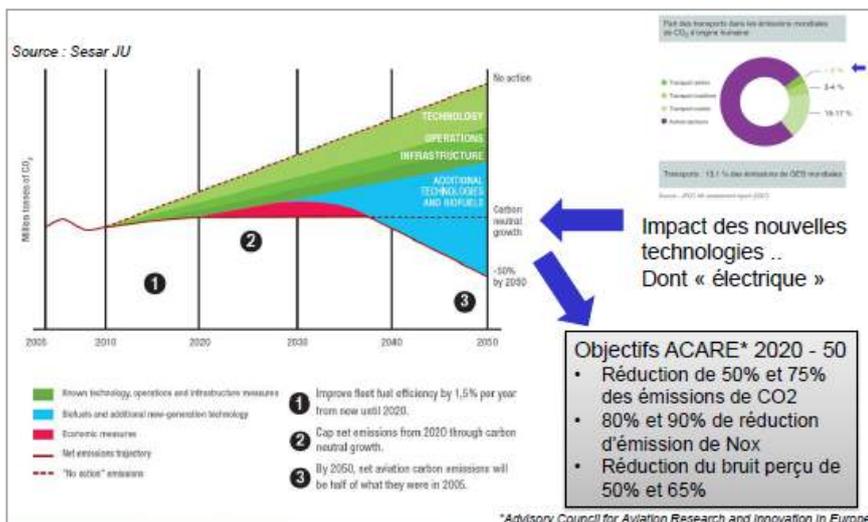


Fig. 1 - Les objectifs ACARE.

La conférence a porté sur le « concept -plane » AMPERE qui utilise un mode de propulsion original, la propulsion distribuée et électrique.

Une longue introduction a permis de situer le programme AMPERE dans le contexte général de l'aviation. Sans changement de politique, il est prévu (IATA 2016) que le trafic aérien, exprimé en nombre de passagers par an, va croître annuellement, en moyenne mondiale, de 3,7% d'ici à 2035. Il n'y a pas d'inquiétude immédiate concernant la disponibilité des ressources fossiles ou renouvelables pour fabriquer le jet fuel nécessaire à cette évolution, la seule incertitude portant sur le coût d'extraction et sur l'impact des politiques environnementales. Le carburant restera l'un des principaux postes du

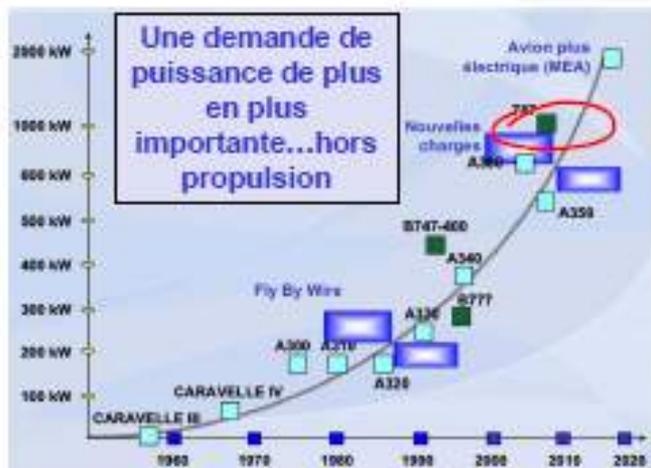
Coût Direct d'Exploitation, entre 30% et 50% (30% en 2017 selon IATA).

Sous l'angle environnemental cette situation a conduit l'Europe, par le biais de l'ACARE (Advisory Council For Aviation Research and innovation in Europe), à définir des objectifs ambitieux à l'horizon 2050 : la stabilisation de la consommation de la flotte commerciale devrait être atteinte vers 2035 (référence 2005) et la consommation diminuée de moitié en 2050 (figure 1). Les nouvelles technologies, dont les technologies électriques, seront déterminantes pour satisfaire l'objectif 2050, limité à des puissances électriques inférieures à 20 kW et donc à de faibles poussées.

Une analyse du marché actuel du transport aérien montre en outre que la demande se situe en majorité sur des distances inférieures à 1000 km, ce qui peut constituer une cible intéressante pour la propulsion électrique. La demande de puissance électrique est déjà en croissance (« More Electric Aircraft ») et il faut aussi raisonner en termes d'énergie embarquée (figure 2). Le défi est donc double : disposer de fortes puissances pour certaines phases de vol et stocker beaucoup d'énergie à bord, tout en maîtrisant la masse.

Il existe un certain nombre de diagrammes permettant de situer les différents systèmes de stockage ou de produc-

Fig. 2 - Les besoins de puissance et d'énergie.



### A la puissance s'ajoute le besoin en énergie

	Puissance maximale (MW)	Energie embarquée (GJ)
Avion de tourisme (ex. DR 400)	0.11	4.3
Avion régional (Ex. ATR 42)	2.7	200
Moyen courrier (ex. A320)	40	900
Long courrier (ex. B777)	164	4000

# Le concept d'avion électrique AMPERE

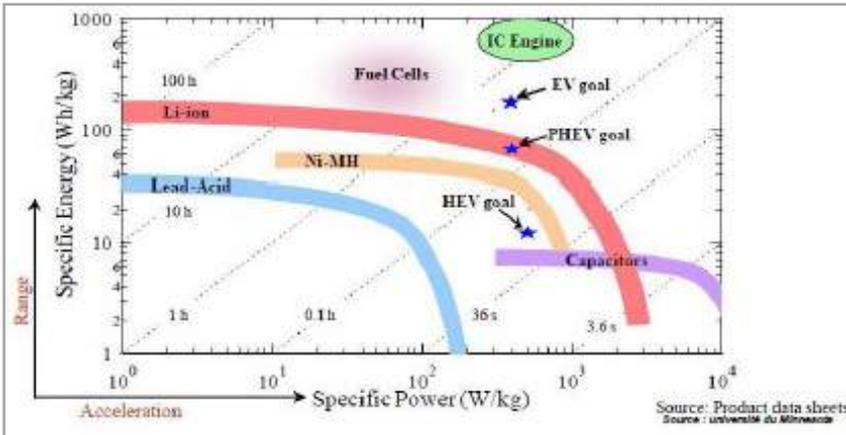
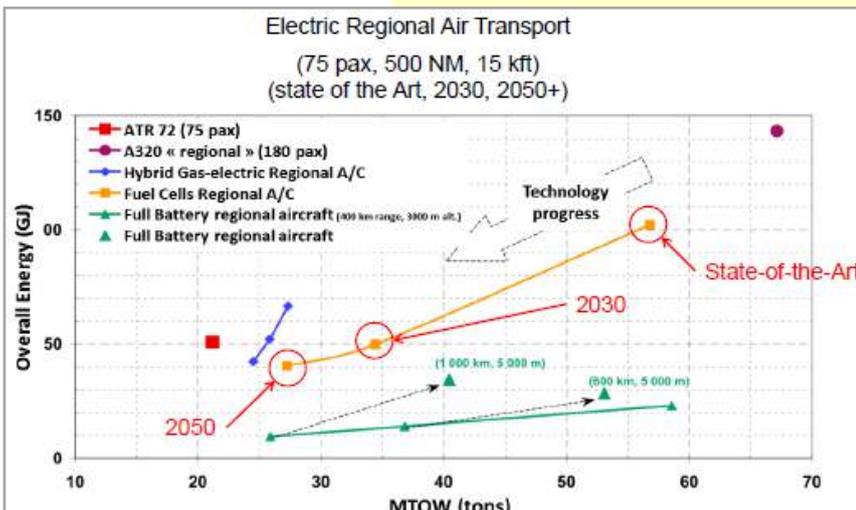


Fig. 3 - Densités de puissance et densités d'énergie.

tion d'énergie électrique, le plus connu étant le diagramme de Ragone (figure 3). Ce diagramme appelle les remarques suivantes :

- les performances actuelles des batteries sont limitées et il existe une relation entre les caractéristiques de puissance (specific power en W/kg) et d'énergie (specific energy en Wh/kg) : plus on recherche une puissance élevée, plus la capacité de stockage est limitée ;
- Il convient de distinguer la performance de la cellule élémentaire d'une batterie de la performance de la batterie conditionnée (« packaging ») ; le chiffre donné pour la batterie conditionnée de la Renault Zoé 1 est 72 Wh/kg ce qui est cohérent avec ce qu'annoncent d'autres sources, en particulier l'Académie de l'Air et de l'Espace ;
- d'autres systèmes de stockage ou de production d'électricité comme les condensateurs ou les piles à combustible présentent des caractéristiques spécifiques en termes de densité de puissance ou de densité d'énergie.

Fig. 4 - Résultat typique de l'étude exploratoire.



Il faut en outre pour les applications tenir compte des rendements de conversion dans la chaîne allant de l'énergie stockée à l'énergie mécanique utile. Le stockage par batterie permet un rendement global de conversion moyen mais est encore lourd. L'association batterie et pile à combustible alimentée à l'hydrogène a été envisagée.

Une présentation synthétique des avions électriques qui ont déjà volé (essentiellement des avions légers « électrifiés ») et des projets plus futuristes d'avions de transport et de taxis aériens pour l'«urban air mobility » a eu lieu. Les réalisations existantes correspondent, d'une part, à des puissances ne dépassant pas 100 kW et, d'autre part, à des autonomies de l'ordre de l'heure. Parmi les concepts novateurs, un certain nombre utilisent la propulsion distribuée et/ou l'hybridation.

La seconde partie de la présentation a porté sur le projet AMPERE de l'ONERA dont la finalité est d'établir la faisabilité et le potentiel d'un petit avion utilisant une propulsion distribuée électrique. Cet exercice fait partie d'un plan plus général concernant tous les avions, depuis les avions légers jusqu'aux moyens courriers de transport. La démarche est structurée par des études de type système (conception multidisciplinaire intégrée) et emprunte des informations externes pour certaines technologies. En ce qui concerne AMPERE, il a une filiation directe avec le projet PPLANE, qui a fait l'objet d'un programme européen, appareil automatique de 4 à 6 sièges, capable de voler sur 500 km en deux heures (croisière à 3000 m, cabine non pressurisée), écologique et STOL. Le CEA Tech a été associé au groupe de prospective dont sont issues les grandes lignes de ce projet, pour les aspects technologiques des sources d'énergie, groupe dont quelques résultats sont illustrés figure 4. Ces résultats sont bien entendu très dépendants des hypothèses prises pour l'évolution des technologies.

La configuration générale d'AMPERE s'appuie sur une propulsion distribuée (32 fans montés sur l'aile) et électrique (batteries et piles à combustibles également très distribuées).

Le concept veut répondre aux principales contraintes de dimensionnement de la

## Le concept d'avion électrique AMPERE

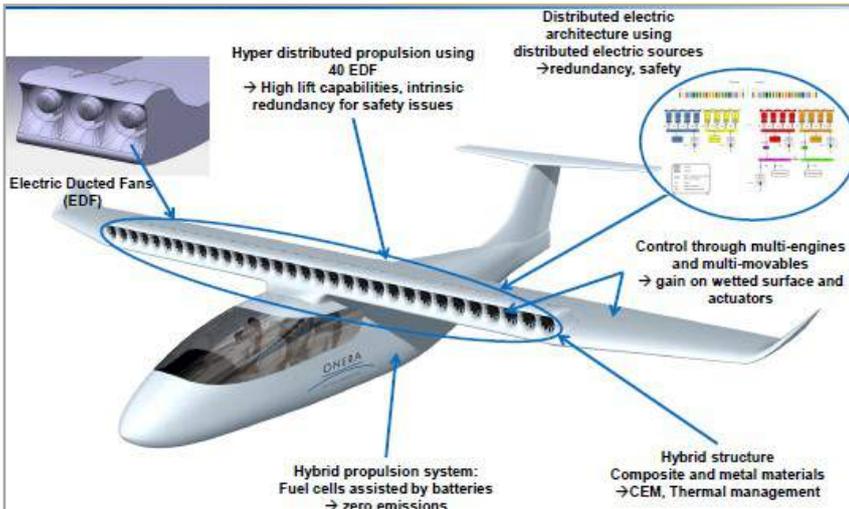


Fig. 5 - La configuration générale d'AMPERE.

norme CS23. Dans le dimensionnement d'AMPERE, les organes de propulsion (batteries, piles à combustible, réservoirs d'hydrogène comprimé) interviennent pour 890 kg, pour une masse maximale au décollage de 2400 kg.

Les travaux menés à ce jour ont utilisé une approche mixte numérique et expérimentale. Le numérique a principalement porté sur l'aérodynamique et les lois de contrôle. L'expérimental s'est limité pour l'instant à une maquette à l'échelle 1/5 installée dans la soufflerie basse vitesse de l'établissement ONERA de Lille (ex IMFL), figure 6. L'envergure de la maquette est 2,9 m, le coefficient maximal de portance mesuré a été de 4,7.

Une fois l'architecture définie, la construction de la maquette AMPERE s'est fondée sur une majorité de composants sur étagère (les 32 fans élémentaires ont un diamètre de 50 mm). La cellule a été réalisée par la société Aviation Design.

Fig. 6 - La maquette AMPERE dans la soufflerie L2 de Lille.



Deux séries d'expériences ont été réalisées avec ou sans propulsion, en faisant varier de nombreux paramètres (angle d'attaque, angle de dérapage, déflexion des surfaces de contrôle, poussée des fans, distribution des poussées le long de l'aile, ...). Le nombre d'essais a dépassé 300. À ce jour tous les essais n'ont pas été dépouillés de sorte que le modèle global d'aérodynamique n'est qu'ébauché, que la stabilité n'est encore qu'imparfaitement connue, de même que les lois de contrôle longitudinal et latéral.

L'aventure AMPERE a été focalisée sur la propulsion distribuée électrique en vue de savoir si cette solution est capable de satisfaire une grande partie des exigences environnementales. Elle a été concrète grâce à la construction et à l'essai d'une maquette. L'exploitation en cours des essais devrait permettre d'estimer si l'aviation régionale légère pourrait profiter à terme de ces nouvelles technologies. Les principales questions de l'auditoire ont porté sur les points suivants.

- **Où en est AMPERE ?** La période de conception et d'essais s'est déroulée sur 3 ans de 2015 à 2017. Le dépouillement des essais en soufflerie n'est pas terminé. La suite risque de poser un problème de financement.
- **Quelle a été la contribution de CEA Tech ?** Cette contribution a uniquement porté sur les sources d'énergie dans la phase prospective.
- **Quelle est l'empreinte acoustique d'AMPERE ?** Elle n'a pas encore été estimée.
- **Les batteries posent-elles un problème ?**

# Le concept d'avion électrique AMPERE



Jean Hermetz (ONERA) lors de sa conférence.

me de sécurité ? Oui, il s'agit d'une vraie question, de même que leur durée de vie.

- **A-t-on idée du coût d'un tel avion ?** Non on est encore loin d'une analyse économique.
- **Le profil d'aile a-t-il été optimisé ?** Plusieurs profils ont été étudiés, le profil a peu d'incidence sur la performance aérodynamique.
- **Une panne d'un fan ne risque-t-elle pas d'induire une forte distorsion de l'écoulement autour de l'aile ?** Ce n'est pas exclu, des essais sur la maquette ont été réalisés dans ce sens mais restent à dépouiller.

Jean Hermetz a eu le mérite de dévoiler ce que représente le concept AMPERE

dans ses grandes lignes. S'agissant d'un système original associant propulsion largement distribué et usage massif de l'électricité, il est naturel de se poser de nombreuses questions concernant les technologies mises en œuvre. On attend avec impatience la suite des travaux.

CR

A poster for the 'Les Conférences du Groupe Ile-de-France' titled 'LE CONCEPT D'AVION ÉLECTRIQUE AMPERE'. The poster features the 3AF logo and the text 'Par Jean Hermetz, ONERA; Département Traitement de l'Information et des Systèmes'. It includes details about the conference date (Mardi 12 Juin de 18h30 à 20h) and location (Mairie du 15e arrondissement, 31 rue Péciot - 75015 Paris). The poster also mentions that the conference is free and open to all, and provides a link for registration: <https://www.3af.fr/evnement/conference-projet-ampere>. At the bottom, there is a 'CALENDRIER DES PROCHAINES CONFÉRENCES 3AF ILE-DE-FRANCE (PROJETS)' listing other events like 'La Voiture Aérienne' and 'Mega-Constellations de satellites'.

Fig. 7 - L'auditoire du 12 juin 2018.

## La voltige aérienne, la tête à l'envers, les pieds sur terre

Par **Pascale Alajouanine** (double championne d'Europe de voltige aérienne)

Mardi 18 Septembre 2018 de 18h30 à 20h

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris (Métro Vaugirard)



Fig. 1 - Pascale Alajouanine ; CAP 332, meeting de Toussus-le-Noble.

de vol par la DGAC des CAP 232 suite à l'accident de Jean-Michel Delorme ne lui permettra plus de se préparer pour la compétition internationale qui suivra mais elle participera avec bonheur à de nombreuses réunions aériennes.

**Historique [1]** : les premières figures aériennes sont exécutées en septembre 1913 et attribuées à Adolphe Pégoud<sup>2</sup> et Piotr Nesterov<sup>3</sup>. Le premier exécuta le premier vol sur le dos et les premières boucles de l'histoire de l'aviation lors d'un vol de démonstration à Juvisy-sur-Orge, le second les premières boucles en Russie à Kiev. Ces premières figures sont ensuite perfectionnées et enrichies par les pilotes militaires lors de la Première Guerre Mondiale afin d'échapper à ou mieux encadrer l'avion ennemi. La guerre terminée, la voltige aérienne devient une attraction puis une discipline aérienne avec des compétitions à partir de 1930. La première d'entre elles s'est tenue à Paris les 9 et 10 juin 1934 à l'initiative de l'Aéro-Club de France (AéCF).

**La voltige aérienne** : la voltige aérienne est un sport spectaculaire, une discipline artistique physique pour laquelle il reste recommandé de manger légèrement avant chaque vol, d'éviter les boissons gazeuses et de privilégier les sucres lents. Les pertes de connaissance liées aux accélérations positives (*le sang quitte la tête, voile noir*) et

**1. Avion CAP 231 & 232** : les CAP 231 et 232 sont issus du CAP 230 qui dérive de la famille des CAP 20, 20L et 21, eux-mêmes provenant du biplace-école CAP 10. Le CAP 231 apparaît en 1990 qui donne naissance au CAP 231 EX en 1991, une version sur lequel est montée une aile en carbone issu d'un EXTRA 260. Cette dernière version donnera naissance au CAP 232 qui conservera le fuselage bois des CAP sur lequel sera montée une voilure en carbone développée au sein des ateliers Mudry. Les CAP 231 et 232 ont été plusieurs fois les avions des championnes et champions du monde et d'Europe de voltige (voir les notes indexées 3 et 4 pour les caractéristiques principales).

Le 18 septembre 2018, le groupe 3AF Ile de France avait le plaisir d'accueillir, à la mairie du 15ème, **Pascale Alajouanine, double championne d'Europe de voltige aérienne**. Une occasion de retracer son parcours, d'expliquer les règles de ce sport exigeant, les rouages de la compétition, d'évoquer son palmarès aéronautique, ses rencontres au sein de l'équipe de France, au sein des meetings et de faire part de ses retours d'expériences.

Pascale Alajouanine, épouse de Régis Alajouanine, pilote voltigeur et créateur de l'Amicale de voltige de Saint-Cyr-l'École, prend ses premières leçons de pilotage à l'âge de 27 ans et obtient son brevet de pilote en septembre 1982. Initiée aux figures acrobatiques dès 1981, elle aborde la voltige de compétition aérienne sur CAP10 à partir de 1985, termine seconde de la Coupe Espoir la même année, troisième de la Coupe Desavois en 1987 et devient championne de France biplace en 1989.

Ces résultats lui permettent alors de voler sur CAP 231<sup>1</sup> et CAP 232<sup>1</sup> pour aborder les compétitions internationales. Elle devient championne du monde par équipe en 1994, championne de France en individuel et championne d'Europe en 1995. Elle enrichit son palmarès en remportant trois nouveaux titres de championne de France en 1996, 2000 puis en 2002, année durant laquelle elle remporte de nouveau un titre de championne d'Europe. De nouveau championne de France en 2004, elle est sacrée vice-championne du monde en juin 2005 en programme libre. L'interdiction



Fig. 2 - Échanges avec le public à Dunkerque après une présentation.

# La Voltige Aérienne, la tête à l'envers, les pieds sur terre



Fig. 3 - CAP 332 lors du meeting de Lens.

**2. Adolphe Pégoud** (1889-31 août 1915) est un aviateur français de la Première Guerre Mondiale. Il apprend à piloter en février 1913, obtient son brevet le 1er mars et est engagé comme pilote d'essais par Louis Blériot. Il effectue le premier saut volontaire en parachute de l'histoire le 19 août, le premier vol "tête en bas" sur plus de 400 mètres le 1er septembre et réalise une série de figures acrobatiques dont une boucle le 21 septembre 1913. Il sera tué au combat le 31 août 1915 à l'âge de 26 ans.

**3. Piotr Nesterov** (1887-1914) était un voltigeur aérien et aviateur de l'armée de l'air impériale russe. Il exécute un des premiers loopings de l'histoire de l'aviation et décède lors d'un abordage volontaire le 26 août.

négligentes (le sang se concentre dans la tête, voile rouge) peuvent respectivement occasionner des pertes de connaissances ou des lésions (éclatement des vaisseaux sanguins...) graves. Pour ces raisons, les accélérations positives et négatives ne doivent respectivement pas dépasser +10g et -10g.

**La condition physique** : chaque voltigeur doit être en bonne condition physique (rythme cardiaque bas, tension artérielle stabilisée), posséder une sangle abdominale satisfaisante pour compenser l'absence de combinaison anti-g, maîtriser l'ensemble des figures associées à son niveau et connaître parfaitement les limitations physiologiques liées aux différentes figures.

(i) Symptômes associés aux accélérations

positives :

- voile gris : le sujet perd la perception des couleurs ; ce symptôme est facilement réversible lorsque la cause cesse ;
- vision tunnel : la vision périphérique disparaît progressivement ;
- voile noire : la vision disparaît sans perte de connaissance ;
- black-out : le pilote perd connaissance (risque élevé).

(ii) Symptômes associés aux accélérations négatives :

- voile rouge : dilatation avec ou sans rupture des vaisseaux capillaires (ou autres) de la tête.

**Les qualités requises** : le voltigeur doit posséder une bonne orientation spatiale, être capable de résister aux accélérations positive et négative (+10 g, -10 g), au stress des compétitions (attentes, horaires, mémorisation des enchaînements...), faire preuve de rigueur (respect du volume de voltige, des limites du domaine de vol, des vitesses et de la position de l'avion dans l'espace...), de précision (respect des figures imposées, des limites d'accélération), de persévérance (maîtrise complète des figures et des enchaînements), d'endurance (10 minutes de figures enchaînées pour les programmes connus...), d'humilité et rechercher la perfection tant au niveau de son entraînement que dans l'exécution des figures.

Fig. 4 - CAP 332, salut du public en fin de présentation, passage tranche.



# La Voltige Aérienne, la tête à l'envers, les pieds sur terre



Fig. 5 - Tableau de bord du CAP 332 avec enchainements de vol en meeting.

## 4. Caractéristiques CAP 231 :

Aile bois  
 Longueur : 6,75 m  
 Envergure : 8,80 m  
 Hauteur : 1,90 m  
 Surface alaire : 9,86 m<sup>2</sup>  
 Masse à vide : 630 kg  
 Masse en voltige : 730 kg  
 Masse maximale : 820 kg  
 Moteur : 6 cylindres à plat Lycoming (300 ch)  
 Réservoir carburant : 65 l

### Performances

Vitesse maximale : 380 km/h  
 Vitesse de croisière : 300 km/h  
 Vitesse décrochage : 90 km/h  
 Vitesse ascensionnelle : 16 m/s  
 Charge alaire : 74,0 kg/m<sup>2</sup>  
 Facteur de charge : +10 g ; -10 g

## 5. Caractéristiques CAP 232

( différences / CAP231 ) :

Aile carbone  
 Envergure : 7,40 m  
 Surface alaire : 10,85 m<sup>2</sup>  
 Masse à vide : 590 kg

### Performances

Vitesse maximale : 405 km/h  
 Vitesse de croisière : 330 km/h  
 Vitesse décrochage : 105 km/h  
 Vitesse ascensionnelle : 18 m/s  
 Charge alaire : 54,4 kg/m<sup>2</sup>

**6. Avion CAP 332 :** un CAP 232 équipé d'un moteur de 330 ch (plus puissant) et d'un renforcement de la partie arrière ; une évolution certifiée (STC) réalisée par le club AVA.

**La compétition :** la voltige aérienne se pratique dans un volume cubique de 1000 mètres de côté positionné à 100 mètres au-dessus du sol et matérialisé au sol par des repères blancs de neuf mètres sur deux. Les compétiteurs se mesurent lors de programmes connus ou non à l'avance, ou lors de programmes libres. Les programmes connus sont préparés pour le jour de la compétition ; les programmes inconnus, les plus sélectifs, sont dévoilés aux pilotes quelques heures avant la compétition ; les programmes libres sont choisis et préparés par chacun des pilotes.

**Les niveaux de la compétition :** les compétitions s'effectuent à bord d'avions biplaces ou monoplaces du niveau Débutant ou Espoir à la catégorie "Unlimited" en monoplace. À chaque type d'avion, bi-

place ou monoplace, sont associées 3 catégories. Aux avions biplaces sont associées les catégories Espoir (*premier cycle*), Promotion (*second cycle*) et National 2. Aux avions monoplaces sont associées les catégories National 1, Excellence et Élite. Chaque compétiteur doit obtenir une note supérieure à 7/10 lors d'une compétition officielle pour prétendre concourir sur la catégorie supérieure d'une année sur l'autre, 7,5/10 pour pouvoir concourir dès la première année.

**Les avions d'entraînement et de compétition :** parmi les avions les plus utilisés, figurent le CAP 332<sup>6</sup>, le Sukhoi 31, l'Extra 330 SC et l'Edge 540.



Fig. 6 - EXTRA 330 SC.



Fig. 7 - EDGE 540.

Fig. 8 - Préparation avant l'épreuve du championnat de France à Mimizan.



# La Voltige Aérienne, la tête à l'envers, les pieds sur terre



Fig. 9 - Répétition du programme à Antalya (Turquie), 2007.

## Palmarès de Pascale Alajouanine :

- 1985 : 2e de la coupe Espoirs 1er cycle (1ère femme) ;
- 1987 : 3e de la coupe Espoirs 2e cycle (1ère femme) ;
- 1989 : championne de France biplace à Orléans ;
- 1992 : sélection en équipe de France (remplaçante) ;
- 1993 : titulaire et vice-championne d'Europe par équipe à Grosseto (Italie) ;
- 1994 : championne du monde par équipe à Debrecen (Hongrie) ;
- 1995 : championne de France monoplace à Montluçon-Guéret et championne d'Europe individuelle à Hradec Kralove (République Tchèque) ;
- 1996 : championne de France monoplace à Marmande et 5e au championnat du monde à Oklahoma-City (USA) ;
- 1997 : vice-championne d'Europe individuelle programme libre à Antalya (Turquie) ;
- 1998 : vice-championne du monde ;
- 1999 : vice-championne d'Europe par équipe à Cordoba (Espagne) et de France à Pau ;
- 2000 : vice-championne du monde par équipe à Toulouse et championne de France à Mimizan ;
- 2001 : championne de France à Saint-Yan et 4e au championnat du monde à Burgos (Espagne) ;
- 2002 : championne de France à Bordeaux et championne d'Europe individuelle à ISTRA (Lituanie) ;
- 2003 : 4e au Championnat du Monde à Lakeland (Floride) et championne de France ;
- 2004 : 4e au Championnat d'Europe à Kaunas (Lituanie) et championne de France à Jonzac ;
- 2005 : vice-championne du monde du Programme Libre à Burgos et championne de France.

**Ouvrage paru :** Guide de l'Instructeur Voltige et du Voltigeur 2e édition, Cépaduès, 2020, référence 1740, ISBN 978-2-36493740-6.

**Depuis 2006 :** de nombreuses démonstrations dans les meetings aériens sur CAP 232 et 332 SC.

PG

Fig. 10 - Vol en patrouille près de Montluçon-Guéret, CAP 332 (2018).



Par **Benoît Biraud**, ingénieur en chef du moteur SaM146, Société Safran

**Mercredi 19 septembre 2018, Salle de l'Espace du CNES**

(Conférence organisée par la commission technique Propulsion de 3AF avec le groupe Ile-de-France)

**PowerJet – La Joint Venture Safran Aircraft Engines – UEC-Saturn et les partenariats**

En Juillet 2004, UEC-Saturn & Safran Aircraft Engines créent PowerJet, société commune 50/50.

Safran Nacelles concevra la nacelle.

Avio est retenu par Safran Aircraft Engines.



**SAFRAN**

CORE ENGINE  
ACCESSORY DRIVE  
CONTROL SYSTEM  
Responsible for propulsion system integration and flight tests



SaM146

**SATURN**

FAN  
LOW-PRESSURE COMPRESSOR  
LOW-PRESSURE TURBINE  
Responsible for final engine assembly and ground tests

Fig. 1 - La création de PowerJet et le partage des tâches.

**1. CFM56** : nom d'une série de turboréacteurs à fort taux de dilution fabriqués par CFM International dont la poussée varie de 82 à 151 kN. 26000 exemplaires avaient été livrés en 2014 en service sur plus de 12000 avions.

**2. LEAP** : pour Leading Edge Aviation Propulsion, réacteur double-flux double-corps avec un taux de dilution de l'ordre de 10.

Après un rappel des produits développés par Safran Aircraft Engines, notamment en coopération avec General Electric (CFM56<sup>1</sup>, LEAP<sup>2</sup>), l'orateur a expliqué ce qui a conduit Safran à lancer le développement du moteur SaM146 avec le motoriste russe Saturn à Rybinsk. À la fin des années 1990, Safran a fait un choix stratégique pour devenir un intégrateur de produits civils. Le partenariat avec General Electric pour les moteurs à forte poussée était bloquant et pour les moteurs de moyenne poussée Safran aurait dû affronter la concurrence de General Electric qui développait le CF34. Le marché régional était à l'époque porteur avec une prévision de 5000 à 6000 moteurs sur 20 ans. Le gouvernement russe poussait pour sa part le développement d'un avion régional civil, le RRJ, qui allait devenir le SSJ de Sukhoï. Pour cet avion, un certain nombre de moteurs dans la gamme requise de poussée ont été mis en concurrence, en particulier le CF34 de General Electric et le BR700 de Rolls-Royce Deutschland ; Safran a aussi essayé de travailler, sans succès, avec Pratt et Whitney, en raison d'un projet passé (le SPW14 pour le Fairchild Dornier 728). Le projet franco-russe a finalement été sélectionné dans la mesure où Safran possédait un corps haute pression issu du

programme français DEM21 et avait déjà travaillé par le passé avec Saturn. De son côté General Electric était retenu par AVIC pour le projet chinois ARJ21 et Boeing supportait Sukhoï pour le RRJ.

En 2001, Safran Aircraft Engines et JEC-Saturn signent une lettre d'intention et en 2004, les deux sociétés créent une filiale commune à 50/50 nommée PowerJet (figure 1). Dans cette société, Safran est responsable de l'intégration du système de propulsion, de la nacelle et des essais en vol. Saturn est responsable du fan, des organes basse pression du compresseur et de la turbine, ainsi que de l'assemblage final et des essais au sol. Avio sera sous-traitant pour la production de la chambre de combustion.

Le SaM146 a adopté une architecture à la fois simple et robuste définie par F+3+6+cc+1+3 (figure 2). Les performances prévues étaient :

	Modèle 1517/1517C
Rapport dérivation	4,4
Rapport de pression global (max.)	28
Poussée	17300 lbf
Croisière SFC	0,63 lb/h/lbf

	Modèle 1518/1518C
Rapport dérivation	4,4
Rapport de pression global (max.)	28
Poussée	17800 lbf
Croisière SFC	0,63 lb/h/lbf

Le développement du SaM146 a été relativement linéaire (figure 3), l'évènement le plus pénalisant ayant été l'arrêt momentané des essais en vol (sur un Iliouchine Il76 LL) par manque de financement. La certification du moteur et de l'avion a finalement eu lieu en parallèle ; le SSJ100 a connu son vol inaugural en

# SaM146, histoire d'une coopération franco-russe

## SaM146 – Une architecture simple et robuste

Architecture SaM146 : F+3+6+cc+1+3 avec

- ❑ Un corps HP basée sur le DEM21 avec un compresseur HP ambitieux de 6 étages.
- ❑ Une aéro 3D sur l'ensemble de la veine
- ❑ Une chambre annulaire performante
- ❑ Un contrôle actif de jeux sur la Turbine Haute Pression
- ❑ Une nacelle longue pour des performances optimisées

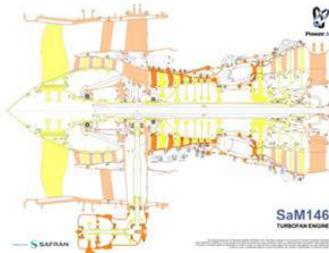


Fig. 2 - L'architecture du SaM146.

2008 et a été certifié en 2011. Les performances prévues ont été tenues. Aujourd'hui, 148 avions ont été livrés (5 types certifiés), ainsi que 350 moteurs (4 ratings).

Cette coopération franco-russe, basée sur des principes simples (partage physique des travaux, partage des coûts de développement, interface unique, rétribution par partage des recettes, une seule autorité de tutelle, l'EASA, une chaîne unique d'assemblage), s'est révélée parfaitement opérationnelle. En outre le partenariat s'est élargi au-delà du SaM146.

En dehors des aspects techniques, l'orateur nous a fait profiter de son expérience humaine de la coopération franco-russe. La Russie aéronautique a été une découverte, des clichés à oublier et surtout des réalités à assimiler. La barrière de la langue a été un obstacle dont il a fallu s'accommoder. Pour résumer :

- la hiérarchie russe est seule décideuse ;
- la stratégie joue un rôle central ;
- dans l'urgence, réactivité et innova-

tion sont présentes ;

- l'écrit est primordial ;
- la relation hommes-femmes est assez égalitaire ;
- le projet SaM146 a été un projet politique réussi.

De nombreuses questions ont été posées après la présentation, voici les principales.

- Quelle concurrence pour le SaM146 en ce qui concerne la consommation et le coût de maintenance ? Des contraintes d'installation ont limité le taux de dilution du moteur. D'autres moteurs conçus plus récemment, notamment ceux utilisant le concept GTF (Geared Turbo Fan) ont une meilleure consommation.
- Quelle approche pour la remotorisation du Beriev200 ? PowerJet ne souhaite pas modifier le SaM146 mais envisage d'en modifier éventuellement le contrôle. Le marché du Beriev200 s'établit entre 150 (bombardiers d'eau) et 400. Il s'agirait d'un nouveau partenariat avec Beriev et peut-être aussi AviaDvigatel de Perm.
- Le SaM146 en service ? Le SaM146 est au niveau du CFM56 : 99,9% de dispatch, 99,9% de départ à l'heure.

Benoît Birard a livré une présentation tout à fait réussie, d'une part sur le plan technique, et, d'autre part, sur le plan culturel, témoignage d'une expérience qui a dû être sans doute passionnante.

PK

Fig. 3 - Les essais du SSJ.



16 Safran Aircraft Engines / 19 Septembre 2018 / Direction Technique

## OneWeb : Méga-Constellations, nouveau paradigme pour la production de satellites

Par Philippe Galland (responsable du retour d'expérience OneWeb chez Airbus Defence & Space)

Mardi 9 octobre 2018 de 18h30 à 20h00

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris (Métro Vaugirard)



Fig. 1 - Représentation d'une méga-constellation de satellites.



Fig. 2 - Présentation par Philippe Galland à la mairie du XVème arrondissement à Paris.

**D**epuis de nombreuses années, les opérateurs d'Internet imaginent des méga-constellations de satellites positionnées en orbite basse pour baisser les coûts et améliorer la qualité des services. Faire évoluer les programmes spatiaux actuels vers cette nouvelle vision nécessite cependant une révolution dans les pratiques dans un secteur plutôt conservateur. Airbus et OneWeb s'y préparent.

Une constellation de satellites est un groupe de satellites artificiels qui travaillent de concert. Un tel système peut être considéré comme un certain nombre de satellites avec une couverture au sol coordonnée, opérant ensemble.

Quelques exemples de constellations de satellites.

- Les systèmes de positionnement par satellite :
  - l'américain GPS (Global Positioning System) ;

- le russe GLONASS (Global Navigation Satellite System) ;
- le chinois Beidou (ou Compass) ;
- l'européen Galileo, en passe de devenir le premier système mondial de navigation sous trois à quatre ans.

- Les services de télécommunication par satellite :
  - Iridium et Iridium Next, pour la téléphonie ;
  - Globalstar, système de téléphonie et de transmission de données à bas débit ;
  - O3b (Other 3 Billion, pour l'internet à haut débit).

Jusqu'ici les constellations de satellites comprenaient quelques dizaines de satellites. Concernant l'internet par satellite, accessible dès les années 90, il n'a pas tenu ses promesses, en raison du coût de mise en place, du temps de latence et du faible débit, et a été supplanté par la 4G/5G et la fibre optique. Aujourd'hui, de nouveaux concepts sont en phase de développement : il s'agit de méga-constellations, qui une fois opérantes, compteraient des centaines de satellites. La première constellation OneWeb vise 900 satellites soit presque autant que les 1200 satellites actuellement actifs ; certains projets prévoient jusqu'à 12 000 satellites lancés en orbite basse.

Actuellement, trois grands projets de méga-constellations de satellites se dessinent, ce sont OneWeb, Starlink et Kuiper Systems, développés sous l'impulsion d'acteurs privés et milliardaires : Gregory Wyler (O3b), Elon Musk (Tesla et Space X) et Jeff Bezos (Amazon). La présente conférence s'est intéressée à OneWeb, qui a noué un partenariat avec Airbus.

**OneWeb** est un projet de méga-constellation de 648 satellites de télécommunication circulant sur une orbite basse et dont l'objectif est de fournir dès 2022 un accès à l'internet haut débit de couverture mondiale et permanente (Terre-Mer), notamment dans les régions non desservies par des liaisons terrestres

# OneWeb : Méga-Constellations, nouveau paradigme...

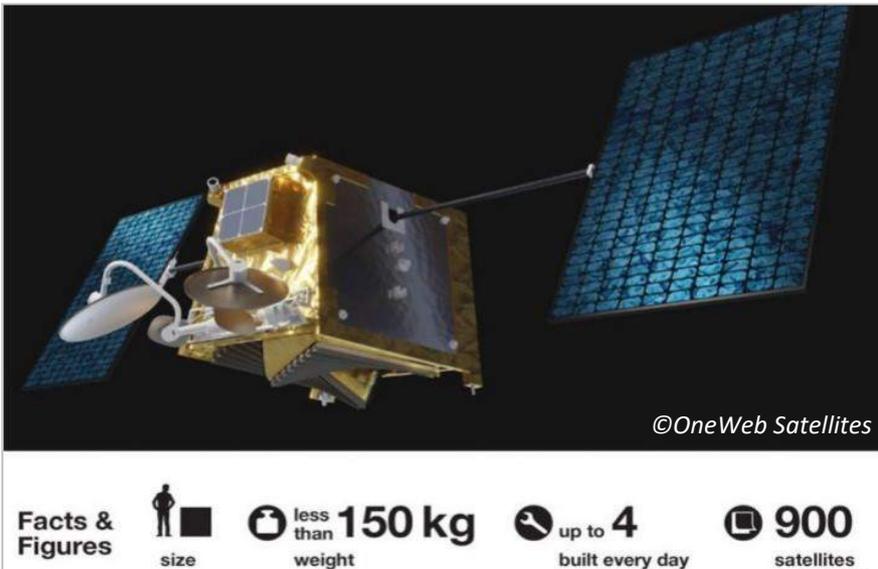


Fig. 3 - Nombres clés de OneWeb.

en 2018 (date de la conférence), 56 % de la population mondiale, soit 3 milliards de personnes, n'avait pas accès à Internet.

Pour atteindre cet objectif, une co-entreprise est créée entre Airbus et OneWeb nommée OneWeb Satellites (AOS) et cofondée en 2016 (ndlr : depuis la conférence, Airbus a annoncé en juillet 2019 la création du premier centre mondial de production de satellites de communication à Cap Canaveral, en Floride, par le biais de cette filiale OneWeb Satellites).

À travers sa participation à ce projet, Airbus rejoint les opportunités du « New Space », industrie spatiale née aux États-Unis qui ouvre l'accès à l'Espace aux acteurs privés (ou aux partenariats public-privé) ; cela ouvre également le champ pour des technologies et productions séries terrestres aux activités spatiales, ce qui représente un véritable booster de développement.

**Les principaux défis initiaux** de OneWeb sont résumés comme suit :

- concevoir un satellite de moins de 150 kg d'un débit de plusieurs Gbps ;
- produire et lancer 10 satellites «pilotes» en 26 mois, puis 648 satellites en 53 mois ; les cadences de production devront être de 4 satellites par jour ;
- le tout en restant dans un modèle économique générant du profit, avec un prix satellite très bas (de l'ordre de 1M\$).

La mission One Web se compose de 2 segments.

**D'une part pour le segment spatial , la constellation**, dont l'innovation réside dans l'optimisation de la capacité, du nombre et de l'orbite des satellites, les spécificités en seront les suivantes :

- un grand nombre de satellites (648 initialement et 900 en final) pour assurer une couverture optimale de la Terre ;
- une technologie simple et fiable des antennes, en bande Ka et Ku ;
- des satellites compacts de 150 kg, pour minimiser les coûts de lancements multiples, peu coûteux et utilisant des technologies existantes ;
- une altitude de l'orbite de 1200 km, ce qui réduit considérablement le délai de transmission des données ;
- une gestion flexible permanente de la capacité de la constellation en fonction de la demande utilisateurs ;
- une durée opérationnelle des satellites supérieure à 5 ans ;
- le premier lancement prévu en 2018 (ndlr : le tir des 10 pilotes s'est effectué en février 2019).

**D'autre part, un segment sol constitué de stations terrestres :**

- des terminaux d'accès d'un prix très abordable, compacts, multi-utilisateurs ; caractéristiques types : 45 cm - 1 m échangeant en bande Ku avec les satellites ;
- installation simple ne nécessitant aucun pointage précis ;
- les satellites connectant les utilisateurs au réseau internet via les stations « Gateway » (Ka band), constituées d'antennes paraboliques de 3,4 m de diamètre et réparties sur la surface du globe.

Un des objectifs exprimés par OneWeb est de combler la fracture numérique à l'horizon 2027 ; les applications commerciales et les clients visés avec les services OneWeb sont très variés :

- les écoles connectées (continent africain) ;
- l'internet à haut débit par satellite dans les régions non desservies :
  - pour les particuliers ;
  - pour les petites entreprises ;
- les marchés spécialisés comme :
  - le secteur maritime ;
  - le secteur aéronautique ;
  - les gouvernements (premiers secours,

# OneWeb : Méga-Constellations, nouveau paradigme...

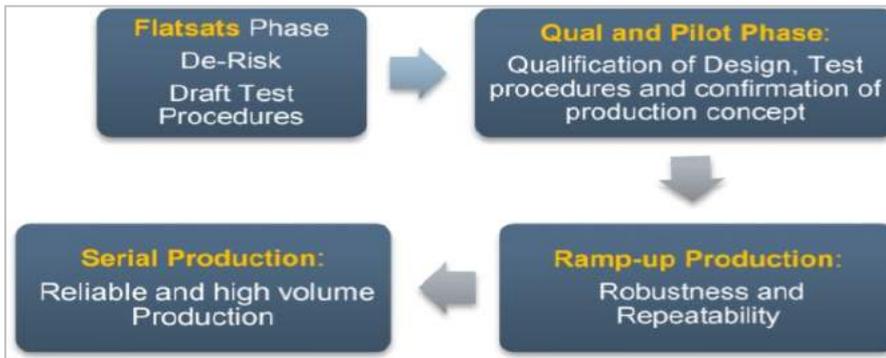


Fig. 4 - Étapes de développement du satellite One Web.

**1. Flatsat :** ensemble des sous-ensembles d'un satellite reliés et testés sur un banc lors d'une étape du développement d'un satellite, à des fins de test.

- militaire... ;
- les industries pétrolières et gaz... ;
- les réseaux cellulaires, avec l'extension du réseau mobile terrestre.

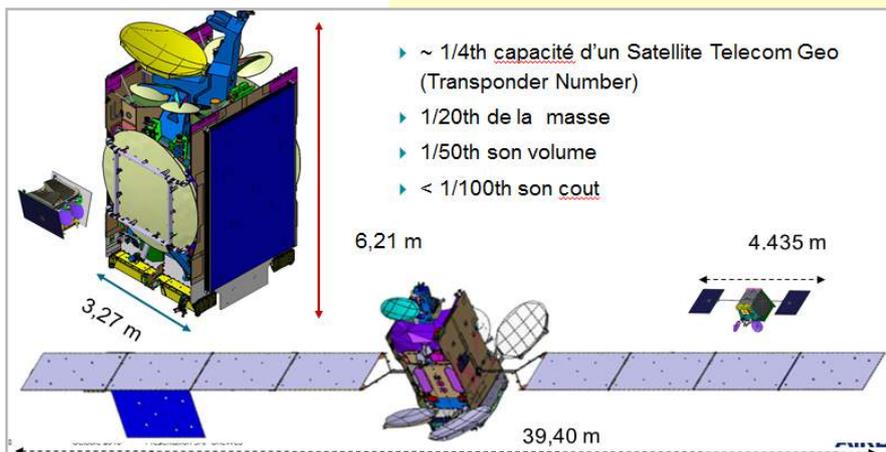
L'organisation industrielle du projet est la suivante :

- Airbus alimente l'ingénierie via la fourniture d'équipements et de sous-systèmes ;
- la "joint venture" AOS est responsable de :
  - la conception et la qualification de satellites et la ligne d'assemblage finale ;
  - la production et le test des satellites ;
  - les livraisons vers les sites de lancement ;
- OneWeb fournit :
  - les services de lancement ;
  - l'ensemble du segment sol ;
  - la gestion et l'exploitation de la flotte ;
  - les services commerciaux ainsi que les terminaux utilisateurs ;
  - les centres opérationnels des réseaux.

Une révolution entre le monde spatial actuel et celui des méga-constellations est nécessaire afin de déployer un système dans un temps court (lancements sur une période inférieure à 2 ans) et d'un prix acceptable :

- passage d'une production de prototype à une production série ;
- diminution des coûts récurrents élevés des satellites vers un très bas coût ;

Fig. 5 - Changement d'échelle entre satellites : quelques chiffres.



- opération de constellations de 4 à 80 satellites maximum vers des constellations de plusieurs centaines de satellites ;
- cycle de production de l'ordre de 6 mois réduit à 3 à 5 jours (typique) ;
- capacité de production de 6 à 10 satellites par an à 2 à 4 par jour.

La logique de développement des satellites est la suivante :

- contrat de développement (basé à Toulouse) :
  - modèles Flatsats<sup>1</sup> ;
  - satellites pour la qualification ;
  - satellites « pilotes », premiers lancés ;
- contrat de production (basé en Floride) pour la production en série de satellites (648 à 900).

Les enjeux pour Airbus sont les suivants :

- les constellations étant proches des satellites à basse altitude actuellement en activité ; l'enjeu est d'assurer un environnement sécurisé par rapport à ces satellites ;
- construire une stratégie à long terme pour le marché des méga-constellations avec une production de série à coût compétitif et de qualité (fiabilité en orbite) en garantissant un « time to market ».

Pour réaliser cela, Airbus s'appuie sur une équipe expérimentée et aux compétences variées, grâce à une expertise groupe dans des industries adjacentes (aéronautique, défense) et des partenaires variés dans d'autres industries comme l'automobile.

Outre la production série et le prix, le design des satellites doit permettre de maximiser la capacité de lancement, donc de faible volume et masse. Le lanceur sélectionné est le Soyuz de Arianespace qui pourra embarquer 32 satellites OneWeb par véhicule de lancement, mais d'autres lanceurs sont également envisagés, ce sont :

- Ariane 6 ;
- Virgin Galactic : Launcher One (capacité : 1 à 2 satellites OneWeb par lancement) ;
- Blue Origin, New Glenn.

Les étapes de la vie d'un satellite OneWeb sont les suivantes :

- lancement ;
- séparation satellite ;
- phase d'initialisation ;

# OneWeb : Méga-Constellations, nouveau paradigme...

**2. LEO** : Low Earth Orbit ou Orbite Basse, zone de l'orbite terrestre allant jusqu'à 2 000 kilomètres d'altitude. On y retrouve des satellites de télé-détection, des satellites de télé-communications ainsi que quelques stations spatiales, dont la Station Spatiale Internationale (ISS).

**3. MEO** : Medium Earth Orbit ou Orbite Terrestre Moyenne, située entre 2 000 et 35 786 kilomètres d'altitude, soit au-dessus de l'Orbite Terrestre Basse et en dessous de l'Orbite Géostationnaire (GEO).

- dégazage ;
- « In Orbit Tests » ;
- phase d'ascension (quelques mois) ;
- mission, d'une durée nominale de 5 ans minimum ;
- désorbitation active en fin de vie ;
- réentrée dans l'atmosphère.

**L'industrialisation est incrémentale et sécurisée par des étapes de validation** avec chronologiquement :

- Flatsats<sup>1</sup> permettant les premiers tests de couplages et d'écritures de procédures de tests ;
- satellite de **qualification** et des **10 pilotes** : qualification du design, procédures de test et confirmation de la bonne conception de la production sur les premiers satellites pilotes lancés ;
- ensuite **montée en cadence** de la production : robustesse et répétabilité ;
- puis la **production série** : production en gros volume et fiable (**de 1 à 4 satellites par jour**).

Tous les équipements du satellite doivent également maîtriser la **même problématique** technique, économique et industrielle et cette « Supply Chain » est au cœur de la réussite de ce projet.

Exemples de nombre de modèles à produire :

- SSPA (Solid State Power Amp.) : 16 200 ;
- roues à réaction : 3600 ;
- viseurs d'étoiles: 1800.

La stratégie de validation pour garantir des produits fiables s'organise comme ceci :

- phases de test couvrant le produit (qualification) puis la production ;
- tests sur des modèles prototypes à modèles séries « vol » ;
- tests optimisés sur l'ensemble des éléments des satellites, du composant au produit final.

Les satellites sont conçus pour être **modulaires**. La production repose sur des concepts de production série avec un « takt time » (durée élémentaire de chaque opération), une semi-automatisation, l'exploitation d'un très grand nombre de données (Big Data), des assemblages fiabilisés et des tests simples et rapides ...

Ceci assure un contrôle rigoureux de production, la fiabilité requise et une maîtrise des cycles de sorties des satellites.

Parmi les méga-constellations pour les télécommunications à « haut débit » placées en LEO<sup>2</sup> ou en MEO<sup>3</sup> on peut citer les suivantes (plus ou moins avancées selon les projets, informations à la date de la conférence) :

- Telesat Leo (117 satellites, 1000 km d'altitude, Canada), LeoSat (108 satellites, 1432 km d'altitude, Canada), constructeur à déterminer ;
- Space X Starlink (4425 satellites, 1100 à 1325 km d'altitude, États-Unis), constructeur choisi, lanceur choisi, satellites prototypes lancés ; c'est l'un des projets les plus avancés ;
- Hongyan, (300 satellites, 1100 km d'altitude, Chine) , lanceur choisi ;



Fig. 6 - La ligne d'assemblage final à Toulouse.

©OneWeb Satellites

# OneWeb : Méga-Constellations, nouveau paradigme...

- Samsung (4600 satellites, 1500 à 2000 km d'altitude, Corée du Sud) ;
- Boeing V-band (2956 satellites, 1030 à 1080 km d'altitude, États-Unis).

**OneWeb sera la première méga-constellation jamais réalisée** grâce aux savoir-faire de l'industrie spatiale européenne.

Des approches industrielles spécifiques sont nécessaires avec une production série, basée sur des concepts de l'industrie aéronautique, de l'automobile...

La première ligne d'assemblage Satellite (« FAL ») est opérationnelle à Toulouse et utilisée pour les premiers satellites « Pilotes ». Des tests spécifiques « end to end » incorporant l'ensemble des fournisseurs ont été imaginés. La production en série est prévue en Floride à partir de 2019.

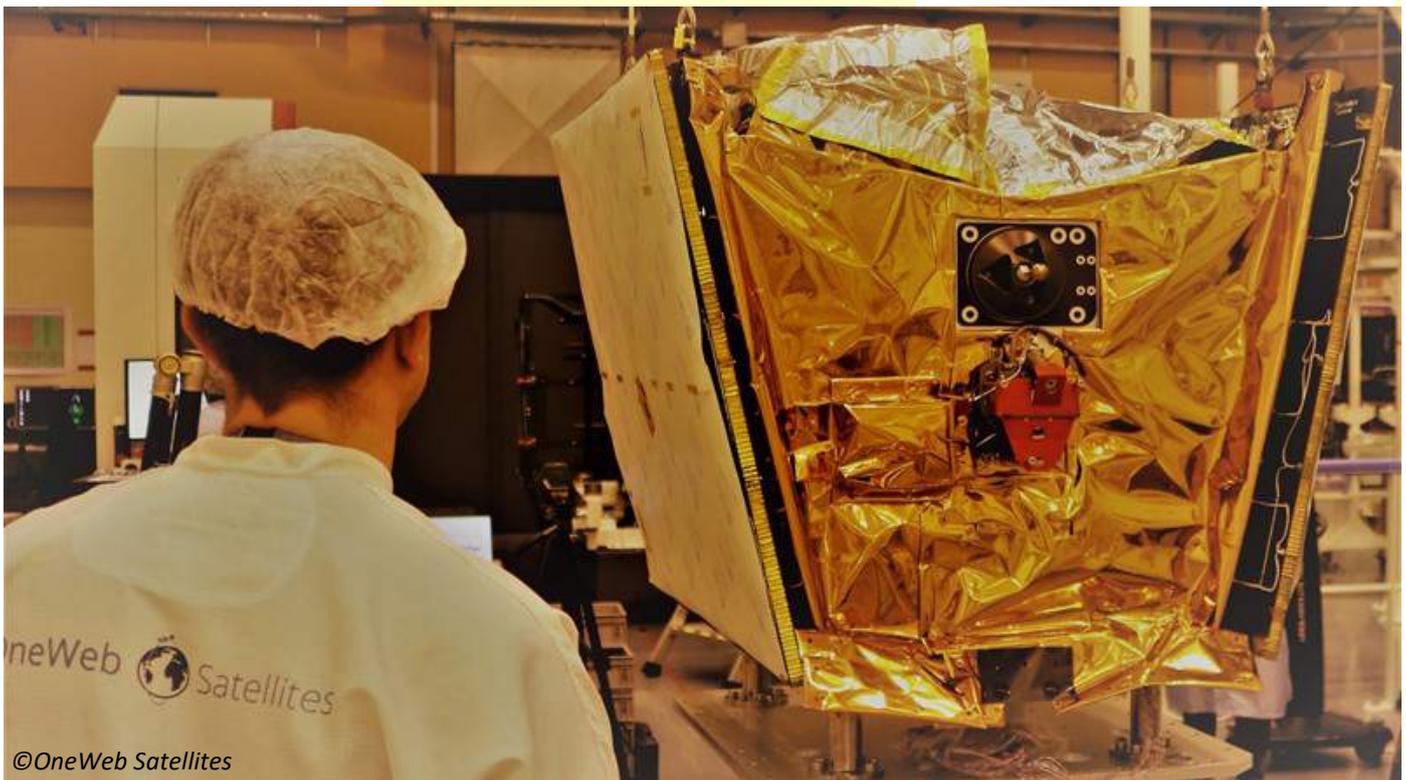
SPL

## Et aujourd'hui?

- **Nouveau produit Arrow<sup>4</sup>, « Flight proven »** : un nouveau produit Plateforme « Low Earth Orbit », à base de propulsion plasmique, est maintenant validé en vol et ouvre des perspectives commerciales réelles grâce à des performances et coûts très attractifs pour cette gamme de puissance.
- **Le « NewSpace », une réalité** : le lancement des Satellites pilotes en février 2019 et la décision de démarrage en production OneWeb dans la foulée confortent la position Airbus dans ces nouveaux marchés. Premier tir de 34 satellites en février 2020 et prochain lancement fin mars 2020 pour ensuite réaliser le déploiement de la constellation. L'usine de Floride produit actuellement de 1 à 3 satellites par jour.
- **Retour d'expérience déjà bien engagé** : les savoirs et savoir-faire développés sur cette activité par AIRBUS, du design à la production en passant par les tests, sont déjà transposés à d'autres projets.

**4. Arrow** : nom marketing plateforme OneWeb.

Fig. 7 - Satellite en cours de qualification.



©OneWeb Satellites

Par **Sébastien Bourdarie** (ONERA, Département PHYsique, Instrumentation, Environnements & Espace (DPHY/ERS))

**Mardi 13 novembre 2018 de 18h30 à 20h00**

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris (Métro Vaugirard)

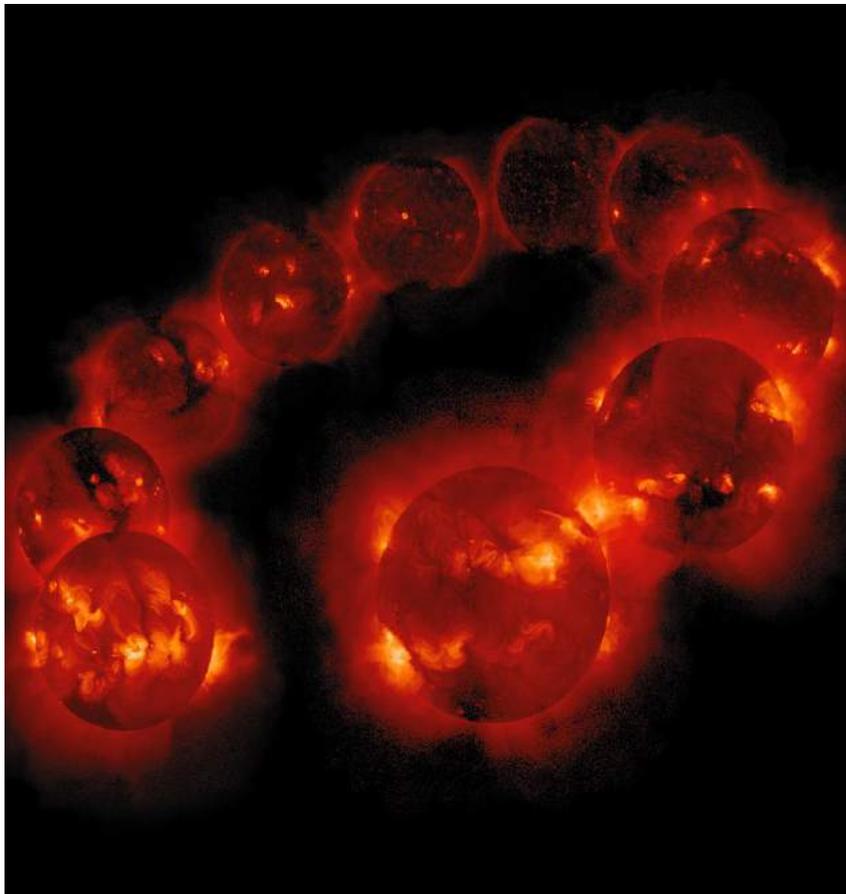


Fig. 1 - Le cycle solaire d'environ 11 ans, David Chenette, Joseph B. Gurman, Loren W. Acton [CCO].

**1. New Space** : industrie spatiale née aux États-Unis qui ouvre l'accès à l'Espace aux acteurs privés (ou aux partenariats public-privé) et étend le champ d'application des technologies spatiales aux activités de type commerciales, véritable booster de développement.

**2. Plasma** : état de la matière, tout comme l'état solide, l'état liquide ou l'état gazeux, sorte de « soupe » d'électrons extrêmement actifs, dans laquelle « baignent » également des ions ou des noyaux atomiques. Les plasmas représentent plus de 99 % de la matière ordinaire dans l'univers.

Avec l'essor du New Space<sup>1</sup>, les effets de l'environnement spatial sur les satellites, la prolifération de débris spatiaux et le développement annoncé de vols habités commerciaux, se pose la question de la possibilité de continuer à utiliser l'environnement spatial de manière sûre.

Les satellites en orbite autour de la terre évoluent dans un environnement radiatif très dynamique contrôlé par l'activité solaire. Ils subissent les effets agressifs de ces variations rapides et transitoires de l'environnement dont :

- des effets sur les électroniques ;
- des effets de charge (décharges électrostatiques).

Les satellites sont essentiellement concentrés sur 3 types d'orbites :

- Global Navigation Satellite System (GNSS) ;
- Geostationary Earth Orbit (GEO) ;

- observation de la Terre.

L'environnement spatial induit des perturbations sur ces satellites qui sont les suivantes :

- bruit dans les imageurs ;
- vieillissement des composants électroniques ;
- vieillissement des revêtements de contrôle thermique ;
- décharge électrostatique ;
- perte de puissance des panneaux solaires ;
- événements singuliers dans les circuits intégrés.

Le soleil est une étoile dynamique, dont l'activité influence notablement la région où évoluent nos satellites artificiels. Le cycle solaire dure 11 ans et présente des périodes d'activités croissantes et décroissantes. Du point de vue des radiations, le cycle solaire :

- structure l'atmosphère, la couronne et le vent solaire ;
- module la fréquence d'occurrence d'éruptions solaires, des éjections coronales de masses et d'autres phénomènes éruptifs géo-efficaces ;
- module indirectement les flux du rayonnement cosmique qui entre dans le système solaire.

Les éruptions solaires sont liées à la présence de tâches à la surface du soleil et ne sont pas distribuées de façon uniforme au cours du cycle solaire. Des éruptions à protons et ions lourds énergétiques se produisent essentiellement en maximum d'activité solaire. Les énergies des protons s'étendent de 1 MeV à plusieurs centaines de MeV. Ces événements durent quelques jours.

Une infime partie (comparé à l'énergie lumineuse solaire :  $10^{17}$  Watts) de l'énergie que nous envoie le Soleil nous parvient sous la forme du vent solaire, un vent de plasma<sup>2</sup>, de matière très diffuse et électriquement chargée, composée d'électrons libres, de protons, et d'une

## L'environnement spatial et ses effets sur les satellites

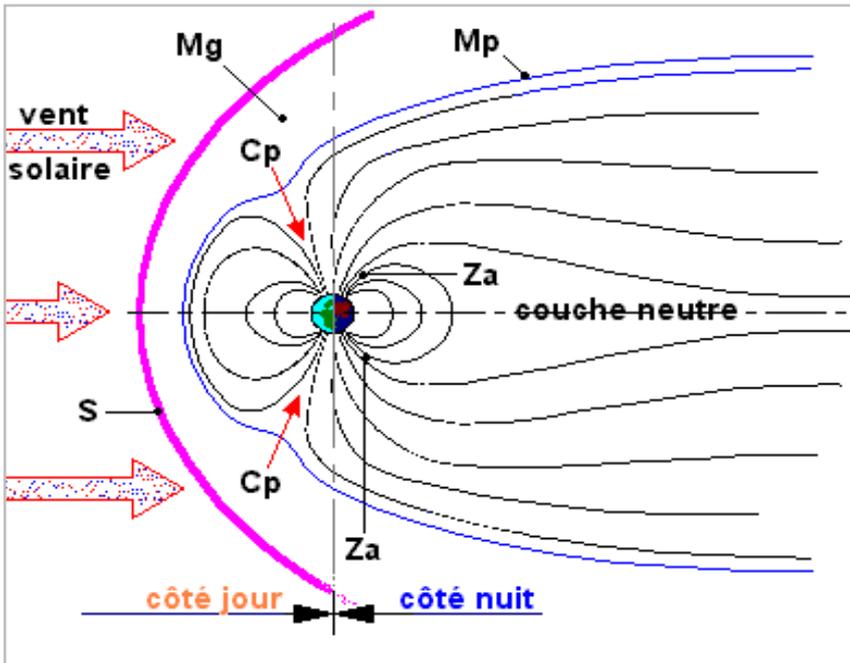


Fig. 2 - Effet du vent solaire sur la magnétosphère. F5ZV sur Wikipédia français [CC BY-SA].

### Légende:

- Mg : magnétogaine
- Mp : magnétopause
- Cp : cornet polaire
- Za : ceinture de radiations
- S : onde de choc

**3. Trou coronal :** zone sombre à la surface du Soleil. La taille, le nombre et la distance aux pôles des trous coronaux évoluent selon le cycle solaire.

**4. Magnétosphère terrestre :** région de l'espace entourant la Terre dans laquelle les phénomènes physiques sont dominés ou organisés par son champ magnétique.

faible proportion de noyaux d'hélium. Sa densité est très faible, typiquement 10 particules par centimètre cube, et la vitesse du vent solaire varie de 300 et 800 kilomètres par seconde au niveau de l'orbite terrestre. Ce vent transporte le plasma et le champ magnétique de la couronne solaire. La puissance apportée par le vent solaire à l'environnement terrestre a été estimée à 100 GW (gigawatts), ce qui suffit à induire des effets électromagnétiques importants dans l'environnement terrestre. D'un côté, le champ magnétique terrestre a une action efficace sur l'écoulement du vent solaire. Réciproquement, l'action du vent solaire modifie le champ magnétique et les plasmas de l'environnement de la Terre, modelant ainsi la magnétosphère, région d'interface entre le milieu interplanétaire parcouru par le vent solaire et la haute atmosphère terrestre.

Une éjection coronale de masse (CME) est souvent associée à d'autres formes d'activité solaire, le plus souvent à des éruptions solaires. On dénombre 3 à 4 CME par jour en maximum solaire, alors qu'en minimum solaire on observe 1 CME tous les 5 jours. Les CME induisent des orages magnétiques : ce sont toujours les plus intenses enregistrés en environnement terrestre. Ils durent typiquement une journée.

Un trou coronal<sup>3</sup> peut être vu plusieurs fois depuis la Terre. Il impose à l'environnement terrestre un vent solaire rapide

avec une récurrence à 27 jours. Il en résulte des orages magnétiques modestes qui durent plusieurs jours.

Le rayonnement cosmique est le flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie qui circulent dans le milieu interstellaire. La source de ce rayonnement se situe à l'intérieur ou à l'extérieur de notre galaxie. Certaines astroparticules qui composent le rayonnement cosmique ont une énergie qui dépasse  $10^{20}$  eV. Le rayonnement cosmique est principalement constitué de particules chargées : protons (88 %), noyaux d'hélium (9%), antiprotons, électrons, positrons et particules neutres (rayons gamma, neutrinos et neutrons).

L'environnement spatial de la Terre peut d'abord être décrit d'après sa magnétosphère<sup>4</sup>. Si le vent solaire n'existait pas, le champ magnétique autour de la Terre serait un champ magnétique dipolaire, il s'étendrait à l'infini dans l'espace, en perdant de son intensité au fur et à mesure de l'éloignement. La magnétosphère a une forme très allongée. Elle s'étend à 60 000 kilomètres de la Terre du côté du soleil (le côté jour), mais à des centaines de milliers de kilomètres du côté opposé (le côté nuit).

En l'an 2000, ce dipôle était excentré de 500 km et incliné de  $11^\circ$ . La dérive séculaire du champ magnétique terrestre se manifeste par un décalage de 4 km/an et une inclinaison de moins de 1 degré/an.

La magnétosphère est sous le contrôle du champ magnétique de la Terre, lequel disparaît totalement dans l'espace interplanétaire. Elle est soumise aux variations continues de la poussée du vent solaire et de son magnétisme, ainsi qu'à une série de processus internes qui la déstabilisent en provoquant des reconfigurations brutales et quasi-quotidiennes.

La limite interne de la magnétosphère, au plus près de la Terre, est constituée de l'ionosphère, qui est la couche atmosphérique de haute altitude (à partir de 60 km) dans laquelle, mêlés au gaz neutre, apparaissent des atomes ionisés, c'est à dire un plasma. Contrairement aux atomes d'une atmosphère neutre, ces atomes chargés électriquement font de l'ionosphère un bon conducteur électrique. Dans la partie basse de l'ionosphère et aux altitudes inférieures à 400

## L'environnement spatial et ses effets sur les satellites

km, les gaz neutres et le plasma sont encore relativement denses et les collisions entre les particules qui la constituent (atomes, molécules, ions et électrons) sont fréquentes. Les collisions engendrent alors des échanges d'impulsion et d'énergie entre particules qui favorisent l'établissement rapide d'un équilibre thermodynamique local, partout dans l'ionosphère.

Dans la magnétosphère, la densité est significativement plus faible et le plasma, d'origine solaire, est nettement plus énergétique. Une particule doit parcourir typiquement une centaine de milliers de kilomètres avant d'entrer en collision avec une autre. Comme c'est aussi la dimension caractéristique de la magnétosphère, on en déduit que le plasma de la magnétosphère est constitué de particules sans collisions les unes avec les autres. Ce plasma n'est pas en équilibre thermodynamique et n'existe pas à l'état naturel sur Terre.

L'absence de collision rend le plasma sans viscosité, l'écoulement du plasma devient turbulent avec une amplification des mécanismes et des effets associés à la turbulence. Les particules étant chargées et en mouvement, celles-ci génèrent des champs électromagnétiques et le plasma

modifie l'environnement électrique et magnétique de la Terre.

La région la plus externe de la magnétosphère est le siège d'une onde de choc au travers de laquelle le vent solaire passe d'une vitesse supersonique à une vitesse subsonique (figure 2). Derrière l'onde de choc est la magnétogaine, une région de plasma parcourue par une grande variété d'ondes électromagnétiques de très basses fréquences. Puis vient la limite proprement dite de la magnétosphère : la magnétopause.

Dans la magnétogaine, s'écoule la matière issue du vent solaire et le champ magnétique est d'origine solaire. Derrière la magnétopause, on rencontre un plasma en partie d'origine solaire, en partie d'origine terrestre, avec des caractéristiques différentes. Seule une faible partie du vent solaire parvient à entrer dans la magnétosphère à travers la magnétopause. En moyenne, la densité de matière dans la magnétosphère est plus faible que dans le vent solaire.

Le champ magnétique de la magnétosphère est d'origine terrestre. En suivant les lignes de champ magnétique, au moins dans une direction, on finit toujours par atteindre l'ionosphère terrestre. La région la plus complexe de la magnéto-

Fig. 3 - Aurore boréale, free-photos par Pixabay.



# L'environnement spatial et ses effets sur les satellites

phère est du côté nuit. Il y a les deux lobes montrés sur la figure 2, au nord et au sud, quasiment dépourvus de plasma.

Entre les deux lobes, la région nommée couche de courant se caractérise par un champ magnétique plus faible, qui change de sens. C'est à cet endroit que s'accumule la majeure partie du plasma de la magnétosphère. Au fur et à mesure que du plasma du vent solaire parvient dans la magnétosphère, la couche de courant se remplit. Cette région est parcourue en permanence par un courant électrique qui va d'est en ouest (perpendiculairement au plan de la figure 2). C'est aussi la région la plus instable : lorsque le plasma s'accumule un peu trop, la couche de courant s'affine (paradoxalement) et le courant s'intensifie. Puis, l'ensemble finit par craquer. La couche de courant se vide en quelques dizaines de minutes. Une partie du plasma part vers l'espace, une autre vers la Terre. Ces épisodes de reconfiguration de la couche de courant où elle se vide subitement sont appelés des sous-orages magnétosphériques. Il se produit typiquement un ou plusieurs sous-orages, ou des pseudo-déclenchements, chaque jour avec des intensités variées, en libérant plus ou moins de plasma avec plus ou moins d'énergie. Les manifestations visibles et spectaculaires de ces sous-orages sont les aurores polaires (figure 3).

Ces événements singuliers entraînent des modifications d'états des circuits électroniques (transitoires, ruptures, verrouillage, perturbations, épuisement...). Les doses ionisantes et les déplacements atomiques induisent alors des dérives et des pertes de fonctionnalités qui peuvent affecter leurs durées de vie.

Les déplacements atomiques entraînent le phénomène de pixel chaud dans les imageurs. Ce phénomène couplé aux événements singuliers ainsi que les charges électrostatiques entraînant des décharges électrostatiques dégradent :

- la sécurité des opérations ;

- la fiabilité ;
- les performances.

Les événements singuliers sont induits par les ions (rayons cosmiques & éruptions solaires) et les protons (éruptions solaires, ceintures de radiation). **Le déplacement atomique** est induit par des protons et des électrons (ceintures de radiation) ; **la dose** ionisante est due aux protons et aux électrons ; les charges électrostatiques sont dues aux électrons.

Les effets sur les satellites dépendent cependant de la dose reçue. Le satellite peut "survivre" lorsque la dose reçue n'excède pas 2 à 3 fois le niveau toléré pour la mission mais devient totalement inopérant (panne fatale) à 7 fois. Ces ordres de grandeur s'entendent pour les satellites construits entre 1980 et 2000 et donnent une idée des marges de sécurité.

**Un exemple d'un effet de déplacement atomique.** Globalstar-1 (2010), 48 satellites opérationnels et 4 recharges. La constellation originale a été déployée entre 1998 et 2000. Entre 2002 et 2004, 24 récepteurs sur 21 satellites ont été affectés, 3 satellites ont été hors services. Chaque satellite a été conçu pour résister 9 ans aux radiations.

**Deux exemples des effet des charge électrostatiques.** Entre le 23 octobre et le 6 novembre 2003, 47 satellites ont enregistré des dysfonctionnements. Le satellite scientifique Midori 2 qui coûtait 640 millions de dollars a été totalement perdu. Ces anomalies sont apparues durant une tempête géomagnétique où ont été enregistrées des variations rapides dans la ceinture de radiation qui ont conduit à un enrichissement des flux d'électrons. En janvier 1994, ont été relevées les pertes temporaires des satellites Anik E1 (des heures), Anik E2 (6 mois) et Intelsat-K (des heures), tous basés sur la même technologie. Tout le Canada fut alors privé de télévision par satellite

En conclusion, l'environnement spatial terrestre subit les influences de plusieurs sources (les éruptions solaires, le rayonnement cosmique et

les ceintures de radiation) et est très dynamique (piloté par l'activité solaire).

Cet environnement est très contraignant pour les systèmes spatiaux (vieillessements, perturbations transitoires) et induit des dysfonctionnements des satellites/charges utiles pouvant aller jusqu'à la perte de mission (plusieurs exemples à ce jour). Les satellites sont cependant globalement résilients grâce à des protocoles strictes de conception (normes ECSS par exemple – European Cooperation for Space Standardization).

SPL

The poster is for a conference organized by the 3AF group in Ile-de-France. It features the 3AF logo and the title 'Les Conférences du Groupe Ile-de-France'. The main topic is 'L'ENVIRONNEMENT SPATIAL ET SES EFFETS SUR LES SATELLITES', presented by Sébastien Bourdarie from ONERA. The event is held on Tuesday, November 13, from 18h30 to 20h at the Mairie du XV<sup>e</sup> arrondissement. It includes a registration fee and a calendar of future conferences. The poster also contains images of the Van Allen radiation belts and a satellite launch scene.

Par **Christian Lardier** (*ex-chef de la rubrique Espace de la revue Air & Cosmos et président de l'Institut Français d'Histoire de l'Espace*)

**Mardi 15 janvier 2019 de 18h30 à 20h00**

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris (Métro Vaugirard)



© PixabayWikimages

Fig. 1 - Station ISS.

**C**hristian Lardier, grand spécialiste de la cosmonautique russe, a publié les livres « L'astronautique soviétique » en 1992, « Les deux vies de Soyouz » en 2010, « Le lanceur Proton » en 2017.

L'idée des stations spatiales destinées à être en orbite terrestre date du début du 20<sup>e</sup> siècle. Le savant soviétique Constantin Tsiolkovsky en avait été l'initiateur. Puis d'autres pionniers s'étaient emparés de cette idée (Hermann Oberth, Hermann Noordung, etc). Puis l'ingénieur allemand Wernher von Braun publie un concept dans la revue Collier en 1952.

Il existe deux types de station spatiale : la monolithique et la modulaire. La première nécessite un lanceur lourd, tandis que la seconde utilise des lanceurs moins puissants mais nécessite d'être assemblée dans l'espace. La desserte des stations par des équipages et des vaisseaux de ravitaillement est assurée par de multiples rendez-vous orbitaux. La mise au point de la technique des rendez-vous orbitaux a nécessité le développement des programmes Gemini aux États-Unis et Soyouz (qui signifie Union en russe) en URSS.

Les stations orbitales sont utilisées pour effectuer des expériences civiles et mili-

taires en apesanteur, comme :

- l'observation de la terre et la géophysique ;
- l'astronomie et l'astrophysique ;
- les études médicales et biologiques ;
- Les expériences technologiques (validation d'équipements en apesanteur, etc).

La concrétisation n'intervient qu'en 1958 avec le début des projets de vaisseaux habités. Les premiers projets américains utilisent la fusée Atlas : la Nasa étudie une station pour deux personnes dans le cadre du programme Mercury, tandis que Krafft Ehrlicke, qui travaille alors chez l'industriel Convair, propose une station pour quatre personnes.

### États-Unis :

- **Projet Horizon de 1959** : une station orbitale équatoriale et une base lunaire permanente déployées avec des lanceurs Saturn.
- **One man Space Station en août 1960** : projet de McDonnell Aircraft, fabricant de l'enin spatial Mercury, avec un homme à bord.
- **La station en configuration hexagonale avec le vaisseau Apollo en 1961.**
- **Maned Orbital Laboratory (MOL) en 1963/69** : projet de station spatiale habitée qui devait essentiellement être utilisée pour des missions d'observation militaire. Station de 14,5 t (avec la capsule Gemini lancée par Titan). Six missions étaient programmées en 1970/75.
- **MORL (Medium Orbital Research Laboratory)** : Station pour 4 à 8 personnes (2 à 4 capsules Gemini-B).
- **Large Orbital ResearchLaboratory (L ORL)** : Station de 112 t lancée par une Saturn-V sur une orbite basse pour une durée de cinq ans. Elle comprend un corps central (laboratoire à gravité zéro) et trois modules de 45 m de diamètre. Ces derniers, en rotation, sont des laboratoires à gravité artificielle. Elle peut être occupée par 24 personnes. Le vaisseau de logistique trans



Fig. 2 - 2001, Odyssée de l'Espace ; film inspiré du modèle de station orbitale proposée par Herman Potočnik.

# Les stations orbitales



Fig. 3 – Skylab.

- porte 12 personnes.
  - **Apollo Applications Program (AAP) en 1965** : Projet du Workshop dans l'étage S-IVB avec le télescope solaire ATM. Approuvé en juillet 1969, il devient le Skylab en février 1970.
  - **Earth orbital space station (EOSS) de 1966** : Projet de station de Douglas utilisant l'étage S-IVB pour 9 personnes.
  - **Skylab (1973/1974, figure 3)** est la première station (77 tonnes) lancée par la NASA. Elle est développée dans le cadre du Programme des applications Apollo. Elle est lancée en 1973 par Saturn-V : 1<sup>e</sup> équipage du 28 mai au 22 juin (28 jours), 2<sup>e</sup> équipage du 28 juillet au 25 septembre (59 jours), 3<sup>e</sup> équipage du 16 novembre au 8 février 1974 (84 jours). La station est rentrée dans l'atmosphère le 11 juillet 1979.
  - **Les projets des industriels McDonnell-Douglas (MDD), Lockheed, North American-Rockwell (NAR), TRW, Grumman dans les années 60.**
  - **Station avec Shuttle à partir de 1972** : station modulaire, Manned Orbiting Facility (1975), Space Operations Center (SOC) de Boeing 1981, Science & Applications Manned Space Planorm (SAMSP) en 1981.
  - **Spacelab (Europe) en 1983/98** : programme décidé en 1973 où l'Europe s'engage à fournir le laboratoire spatial Spacelab qui doit être embarqué dans la soute de la navette spatiale américaine (Shuttle) et permettre d'effectuer des missions de microgravité. Construction de deux modules LM-1 et LM 2, sélection de 4 astronautes européens (Melbold, Ockels, Nicollier, Malerba), premier vol le 28-11-1983. Au total, 16 vols (9 du LM-1 et 7 du LM-2) auxquels s'ajoutent six vols d'Igloo (module pressurisé) avec des palettes (missions Spacelab-2, Astro-1, Atlas-1, Atlas-2, Atlas-3 et Astro-2).
  - **Spacehab en 1993/2007** : laboratoire américain utilisé conjointement avec le Spacelab (22 vols dont 8 pour les missions Shuttle-Mir, figure 5).
  - **Freedom en 1984** : le 25 janvier 1984, Ronald Reagan décide de développer une station orbitale permanente dans la décennie. Cela donne naissance aux conceptx de Power Tower en 1984, Dual Keel en 1986, puis la station internationale Freedom en 1987 (Etats-Unis, Canada, Europe, Japon).
  - **Deep Space Gateway – Lunar Orbital Planorm** : En 2020, projet en orbite lunaire proposé afin de mener des vols habités vers l'espace cis-lunaire. Vol inaugural du SLS-Orion : EM-1 inhabité en juin 2020, EM - en 2023 (module électrique), EM-3 en 2024 (module habitation), EM-4 en 2025 (module logistique), EM-5 en 2026 (sas du DSG), EM-6 en 2027 (cargo, inhabité), etc.
  - **Bigelow Next-Generation Commercial Space Station BA-330** : complexe spatial orbital privé en cours d'élaboration avec des modules gonflables (Projet d'hôtel pour le tourisme spatial).
- URSS/Russie :**
- **Première idée** de station en juillet 1958 avec début des travaux en 1962. Elle doit être lancée par une nouvelle fusée capable de lancer 15-20 t en orbite à développer d'ici 1963-1964.
  - **En 1961**, Korolev propose une station Zvezda développée à partir du vaisseau Sever (ancêtre du Soyouz).
  - **En 1962**, Korolev propose une version du lanceur lourd N-1 apte à lancer une station spatiale lourde de 75 tonnes (TOS, 19K). En 1969, le projet devient le « complexe orbital multifonctionnel » (MOK). La « base-station multifonctionnelle » (MKBS) était envisagée pour 1975/78.
  - **En 1963**, Korolev propose le projet 15K lancé par la fusée 11A58 à étage supérieur cryogénique.
  - **En 1964-1978**, Tchelomei propose le projet **OPS alias Almaz** (11F71). Cette station militaire, lancée par Proton, est équivalente au MOL américain. D'un diamètre de 4,1 m diamètre, elle pèse 15 t et possède une capsule VA (11F74) de 4,9 t. Dans un premier temps, elle est desservie par le vaisseau Soyouz. Puis dans un second temps, par le vaisseau-cargo TKS (11F72) de 20 t. Trois exemplaires ont été placés en orbite entre 1973 et 1976 dont deux d'entre eux ont reçu un équipage. Concurrencé par le programme civil Saliout (figure 4), le pro-

# Les stations orbitales



Fig. 4 - Saliout-1.

-gramme Almaz est arrêté en 1978. Les versions Almaz-K, N et T ont aussi été étudiées.

- **DOS alias Saliout (17K) en 1971-1986** : c'est une famille de stations dont la première de la série, Saliout 1, est lancée en 1971. Avec une masse de 19 tonnes, la station dispose d'un espace habitable de 100 m<sup>3</sup> permettant d'accueillir un équipage permanent de 3

cosmonautes. La relève des équipages est effectuée par des vaisseaux Soyouz. À partir de Saliout 6, un deuxième port d'amarrage permet le ravitaillement par les vaisseaux automatiques Progress et l'accueil d'équipages visiteurs pour de courts séjours.

- **DOS-8 alias Mir-1 en 1986/2001** : le programme débute en février 1976 sur le développement d'une version améliorée des stations spatiales Saliout DOS-17K. Elle fut assemblée en orbite entre 1986 et 1996. Mir est la première station spatiale composée de plusieurs modules, permettant l'exploitation spatiale habitée à long terme (record du plus long vol spatial d'un être humain sans interruption, de 437 jours et 18 heures, effectué par Valeri Poliakov). Mir a été occupée pendant un total de 12 ans durant ses 15 années d'existence. Elle pouvait accueillir un équipage résident de trois cosmonautes. La station Mir-2 a été étudiée en 1989/91.

**Projet de station lourde pour l'industrie spatiale (1992)** : module de production technologique (TMP) de 100 t lancé par



Fig. 5 – Station Mir.

# Les stations orbitales

Energiya, module d'observation de la Terre avec le lidar Tellure-EKO de 20 t lancé par Proton, module de retour technologique Orfar de 20 t lancé par Proton.

## Chine :

- **Shenzhou-11**: Le vaisseau Shenzhou 11 est lancé le 17-10-2016. Les taïkonautes Jin Haipeng et Chen Dong passent 32 jours à bord de la station Tiangong-2.
- Tianhe-1 : station orbitale de 20 t lancée par une LM-5B en 2020.
- Tianzhou-2 : vaisseau-cargo en 2020
- Shenzhou-12 : vaisseau habité en 2020.
- Shenzhou-13 : vaisseau habité en 2020 (depuis la conférence du 15 janvier 2019, l'assemblage de la station orbitale a été décalée en 2021).

## International :

- **Shuttle-Mir 1994/98** : proposition de coopération USA- URSS en 1993, 10 vol entre 1994 et 1998 avec des missions de longue durée d'astronautes américains.
- **Alpha/International Space Station (ISS) 1998-2024** (figure 6) : ce programme, lancé et piloté par la NASA, est développé conjointement avec

l'agence spatiale fédérale russe, avec la participation des agences spatiales européenne, japonaise et canadienne (Accord est signé le 29 janvier 1998). Elle est le plus grand des objets artificiels placés en orbite terrestre. Elle s'étend sur 110 m de longueur, 74 m de largeur et 30 m de hauteur et a une masse d'environ 420 tonnes en 2019. La Station a une architecture avec un segment orbital russe reprenant les choix architecturaux de la station Mir et un segment orbital américain développé selon les standards définis par la NASA. Elle comporte une quinzaine de modules pressurisés, dont quatre consacrés aux expériences scientifiques, représentant un volume d'espace pressurisé d'environ 900 m<sup>3</sup> dont 400 m<sup>3</sup> habitables. Les panneaux solaires, d'une superficie de 2500 m<sup>2</sup>, fournissent 110 kW d'électricité. La Station se déplace autour de la Terre à une altitude maintenue autour de 350 à 400 kilomètres. Elle est occupée en permanence par un équipage international de six astronautes, qui au cours de leur séjour d'une durée de 3 à 6 mois.

Fig. 6 - Station spatiale internationale, 2 vaisseaux Soyouz amarrés à la station en cas d'évacuation d'urgence.



CyC

## L'industrie aéronautique Chinoise, sa longue marche vers une dimension mondiale

Par Jean-Paul Perrais (Académie de l'Air et de l'Espace & 3AF)

Mardi 26 mars 2019 de 18h30 à 20h00

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris (Métro Vaugirard)



Fig. 1 - Le C919, 2017.

Jean-Paul Perrais a commencé sa longue carrière comme Ingénieur de l'Air et a occupé différentes fonctions à la DGA, à la DGAC puis à l'Aérospatiale (maintenant Airbus) ; une partie de ses activités a été consacrée aux relations avec l'industrie aéronautique chinoise. Il a eu l'occasion de se rendre plusieurs fois en Chine et il était donc particulièrement bien préparé pour en analyser l'industrie aéronautique.

L'industrie aéronautique chinoise a connu plusieurs phases d'évolution. Dans les années 50 à 60, l'Union Soviétique avait mis en place une structure semblable à la sienne, avec des « usines villes » assez autonomes et une forte séparation entre bureaux d'études et usines de production. Entre 70 et 80, la Chine a acheté des avions civils occidentaux et a progressivement modernisé ses moyens industriels. Les années 90 ont vu une tentative de participation dans des programmes civils occidentaux (dont le 100 places d'Airbus/ATR), la mise en place de chaînes d'avions occidentaux (dont le MD 80/90 et l'Embraer 145) et le regroupement des constructeurs dans AVIC (Aviation Industry of China). De nouvelles restructurations sont ensuite intervenues au niveau de l'administration centrale. La COSTIND (Commission militaro-industrielle) a été remplacée par la SASTIND (State Administration for Sciences, Technology and Industry for National Defense) et est deve-

nue un département du MIIT (Ministry of Industry and Information Technology) civil. Puis deux nouvelles entreprises aéronautiques ont été créées :

- la COMAC (Commercial Aircraft Corporation of China) en 2008, chargée du pilotage des grands programmes d'avions civils ; son effectif était de 11 000 personnes en 2017 ;
- L'AECC (Aeronautical Engine Corporation of China) en 2016, qui a regroupé toutes les activités liées aux moteurs aéronautiques auparavant placées chez AVIC, et à la qualification des matériaux aéronautiques.

AVIC a gardé ses activités sur les avions militaires. Elle a aussi gardé celles des avions civils régionaux, des hélicoptères, celles qu'elle détenait sur les drones et sur les missiles. Elle est sous-traitante de COMAC pour de grands ensembles d'aérostructures des avions civils à réaction. Son effectif se situe autour de 200 000 personnes, soit au-dessus des effectifs respectifs de Boeing et d'Airbus.

À côté de ces nouvelles entreprises, la recherche appliquée s'est structurée, avec de nombreux et puissants organismes, NDRC (National Development and Reform Commission), SRSC (Scientific Research Steering Committee), universités et instituts et avec le développement de moyens d'essais avancés, au service d'objectifs ambitieux (furtivité pour les

## L'industrie aéronautique Chinoise

avions et les missiles, hypersonique, intelligence artificielle).

Jean-Paul Perrais a d'abord passé en revue les grands programmes d'avions civils.

L'ARJ 21, inspiré du MD80/90, a volé pour la première fois en novembre 2008 et bénéficie d'un carnet de commandes de 528 appareils auprès de 21 compagnies majoritairement chinoises (les compagnies chinoises sont fortement « encouragées » à acheter cet appareil). Après un développement très long, il n'a été mis en service qu'en 2016 et peu d'avions étaient en service début 2019.

Le C919 a fait son premier vol en mai 2017 (figure 1) et devrait entrer en service en 2021 ; son carnet « officiel » de commandes est de 800 appareils, pour des compagnies majoritairement chinoises. De la même classe que l'Airbus A320 et le Boeing 737, le C919 se positionne comme un concurrent chinois pour un marché intérieur très demandeur (2 600 avions de cette classe en service début 2019) mais actuellement totalement équipé par Airbus et Boeing.



Fig. 2 - Le projet sino-russe CR929.



Fig. 3 - J20, le chasseur lourd chinois de 5ème génération.

Le CR929 (figure 2) est un programme en coopération entre la Chine et la Russie mené par la société commune CRAIC (China Russia Commercial Aircraft Int. Corp.) et vise à concurrencer les A330/

A350 et Boeing 787 ; sa masse maximale au décollage sera de 242 tonnes, son rayon d'action de 6 480 NM et sa capacité de 280 à 440 places. L'objectif est une mise en service en 2027.

Il existe aussi des productions d'avions à turbopropulseurs d'AVIC : celle du XAC MA60 (lointain dérivé de l'Antonov 24) est marginale, le XAC MA700 (comparable à l'ATR 72) est en cours de développement (objectif de mise en service en 2022) et le HAIG Y12 (inspiré du Twin Otter canadien) a un bon marché de niche .

Des coopérations ont lieu avec de nombreux constructeurs étrangers, notamment avec UAC (Russie), Airbus, Boeing, Bombardier et Embraer. Le niveau de qualité du travail des sous-traitances est devenu satisfaisant mais la rentabilité reste faible. La chaîne d'assemblage final de l'Airbus A 320 est opérationnelle à Tianjin, plus de 390 avaient été produits fin 2018.

Jean-Paul Perrais a ensuite récapitulé les productions militaires : avions de combat, avions d'entraînement et de transport, avions maritimes et spéciaux, puis les hélicoptères, les drones, l'aviation générale, les moteurs et les équipements. Les tableaux qui ont été présentés sont très complets puisqu'ils prennent en compte des productions qui ont débuté lors de l'alliance avec l'URSS (par exemple le H6 modernisé, un descendant du Tupolev 16), des aéronefs modernes et des projets et concepts ambitieux (chasseur furtif, chasseur-bombardier, bombardier stratégique). À signaler le chasseur lourd J20 (figure 3), qui se pose comme un concurrent du F22 américain.

Pour l'entraînement, il existe un certain nombre d'appareils plus ou moins dérivés de modèles étrangers comme le BAe Hawk ou le Yak 130 (JL8 et JL10).

Le transport militaire moderne peut être illustré par le Y20 (figure 4) qui a une charge utile de 66 t sur 2000 NM, à hauteur du C17 américain (74 t).

Parmi les avions maritimes et spéciaux, il faut remarquer le plus grand amphibie au monde, l'AG600 (figure 5), pour des missions vraisemblablement comparables à celles de l'étonnant ShinMaywa US2 japonais.

L'industrie des hélicoptères doit couvrir une large gamme de besoins tant militai-

## L'industrie aéronautique Chinoise



Fig. 4 - L'avion de transport militaire Y20.

res que civils mais a eu longtemps une faible production. Des coopérations anciennes ont eu lieu avec des constructeurs occidentaux, notamment Airbus Helicopters, et des projets sont envisagés avec la Russie (hélicoptères lourds). Néanmoins



Fig. 5 - L'amphibie AG600.

La Chine reste très dépendante pour les moteurs et les équipements.

La Chine possède une place importante dans l'utilisation de drones militaires de tous types. Beaucoup de ces drones sont armés de missiles ou de bombes et les exportations sont élevées.

L'aviation générale présente un retard sensible du fait de l'étroitesse de l'espace aérien autorisé aux opérations civiles. Une filiale d'AVIC, la CAIGA (China Aviation Industry General Aircraft) a été créée en 2009. Des avions ont été acquis aux Etats-Unis, en Allemagne, en Autriche et en France. À noter l'accord entre CAIGA et l'ONERA pour le développement du Flying Whales, dirigeable de transport de charges lourdes.

Les moteurs constituent un maillon faible de l'aéronautique chinoise. Les moteurs militaires bénéficient d'une priorité et font l'objet de coopérations, en particulier avec le russe Saturn à Rybinsk (ndr : Saturn est le nom moderne du constructeur Alexander Lyulka ; le WS10 chinois

est dérivé de l'AL31 russe et le WS 15 chinois est dérivé de l'AL41 russe). Dans le domaine civil, la Chine tente de construire son propre moteur pour son C919 (programme CX-1000) et semble entretenir une relation avec Avia Dvigatel de Perm (moteur PD 35 pour le CR929, dérivé du moteur PD14, prévu pour le moyen courrier russe MC-21).

Les équipements et matériaux font l'objet de nombreuses coopérations, sous-traitances ou « joint ventures » avec les fournisseurs occidentaux.

À l'issue de ce panorama très complet, Jean-Paul Perrais a proposé une courte synthèse qui peut se résumer comme suit.

La **politique générale de la Chine** dans le domaine aéronautique **visé à terme l'autosuffisance et la compétitivité**. Pour la période présente, elle correspond à des investissements gouvernementaux lourds (moteurs : 48 milliards de dollars entre 2016 et 2020).

La **modernisation de la défense reste la première priorité** et la Chine pourrait devenir un exportateur concurrentiel dans ce secteur économique.

La Chine paraît être **encore dans une phase d'apprentissage** pour les avions civils et reste dépendant de fournisseurs étrangers. Pour combien de temps ? L'administration chinoise doit aussi acquérir la compétence de certificateur primaire pour qu'un gros avion civil de conception chinoise puisse être exporté.

Le **transfert de technologies et de savoir-faire** de l'occident vers la Chine **doit être instruit de façon fine** pour trouver un équilibre entre coopération réelle et compétition. Il paraît toutefois inévitable que la Chine rejoigne un jour le peloton de tête des grands pays aéronautiques.

Les principales questions posées à l'orateur ont porté sur les raisons du retard chinois et les coopérations respectives de la Chine avec Airbus et Boeing ainsi que l'époque à laquelle l'industrie aéronautique de la Chine sera un concurrent majeur dans le domaine civil.

Une présentation donc remarquable proposée par un fin connaisseur du sujet.

PK

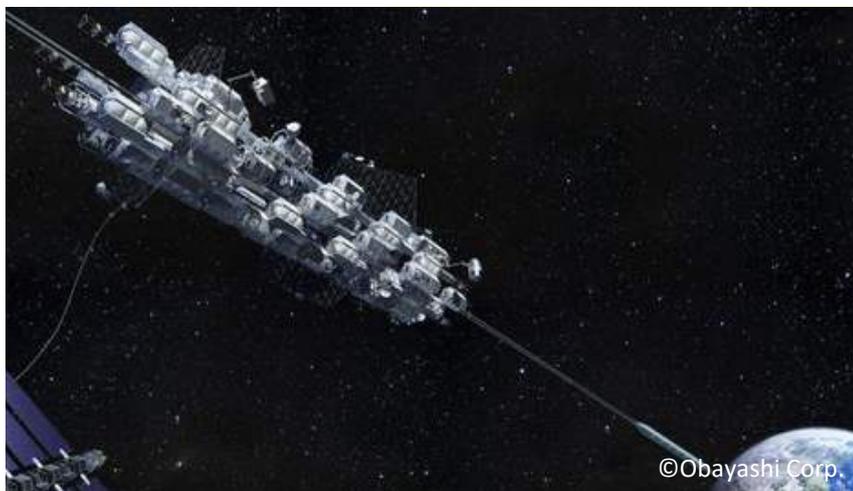


Fig. 1 - Projet d'ascenseur spatial imaginé par l'entreprise de construction japonaise Obayashi Corporation.

**1. Constantin Tsiolkovski (1857-1935)** : enseignant et chercheur autodidacte russe puis soviétique, visionnaire, il est considéré comme le père et le théoricien de la cosmonautique moderne.

**D**e nombreuses équipes dans le monde travaillent sur l'idée d'un ascenseur spatial, dans l'espoir de révolutionner l'accès à l'espace.

Le concept n'est pas nouveau et remonte même à la fin du XIXe siècle, voire bien avant car l'épisode biblique de Babel par exemple évoque déjà l'idée d'« une tour [faite de briques] dont le sommet touche au ciel »... une construction qui mécaniquement n'aurait pu dépasser quelques centaines de mètres d'altitude... Un ascenseur spatial : un tel projet est-il crédible ? Quelles en sont les difficultés ? Comment les surmonter ? Lors de cette conférence, Christophe Bonnal nous a présenté le principe de l'ascenseur spatial, les différents défis qu'il représente et les projets de recherche associés.

L'idée fondatrice d'un ascenseur spatial en revient à Constantin Tsiolkovski<sup>1</sup>, inspiré en découvrant la structure de la tour Eiffel à Paris en 1885. En 1895, il publie l'idée d'une tour gigantesque, placée sur l'équateur et de près de 36000km de haut, le long de laquelle monterait un voyageur, soumis à la gravité (décroissante) et à la force centrifuge (croissante) opposées qui varient lors de l'ascension et forment son poids apparent, jusqu'à se compenser exactement à l'altitude géostationnaire (35790km). Là le sujet n'est plus soumis à aucune force et se trouve en impesanteur : il tourne libre-

ment avec la Terre en restant toujours à la même altitude. Tsiolkovski explique que si le voyageur continue à grimper le long de la tour, la force centrifuge deviendra prépondérante, tendant à l'envoyer dans l'espace. Sur le même principe il calcule l'altitude nécessaire pour être envoyé vers la Lune et vers Mars. Visionnaire, l'idée restera sans suite pendant 75 ans !

Le concept de l'ascenseur spatial est relancé en 1960 (article « Vers le Cosmos en train électrique », méconnu jusqu'en 1967) par Yuri Artsutanov qui propose non plus une tour mais un câble suspendu depuis l'espace, suggérant l'idée d'un « funiculaire de l'Espace ». Un premier calcul fait apparaître que, lors de la construction d'un tel ouvrage, le travail en compression serait tel que même avec les meilleurs matériaux d'époque (acier) il ne résisterait pas. L'option d'une construction depuis l'Espace est également irréalisable, car pour une épaisseur d'un cheveu au niveau de la Terre, il faudrait à l'altitude géostationnaire un diamètre de câble (très) supérieur à celui de la Terre...

Vers la même époque, John Isaacs, avec trois autres océanographes américains, propose dans la revue « Sciences » (« Satellite elongation into a true "Sky Hook" », 1966) l'idée d'un câble extrêmement fin (donc léger, de 500kg) à déployer simultanément par-dessus et par-dessous un gros satellite placé en orbite géostationnaire (où se maintient donc le centre de gravité de l'ensemble). Dès que le câble arrive à la surface de la Terre, il est accroché à son ancre et sert à faire monter une cabine avec un second câble pour renforcer le premier... L'opération répétée un très grand nombre de fois produit in fine un câble suffisamment robuste pour faire monter de lourdes charges. La question du matériau dans ce projet (quartz, graphite ou diamant) se trouve toutefois non résolue, en raison du coût et du risque immédiat de coupure du premier micro-câble par une micro-météorite.

En 1974, après 5 ans de négociations pour pouvoir publier dans la revue Acta Aero-

# L'ascenseur spatial : mythe ou réalité ?

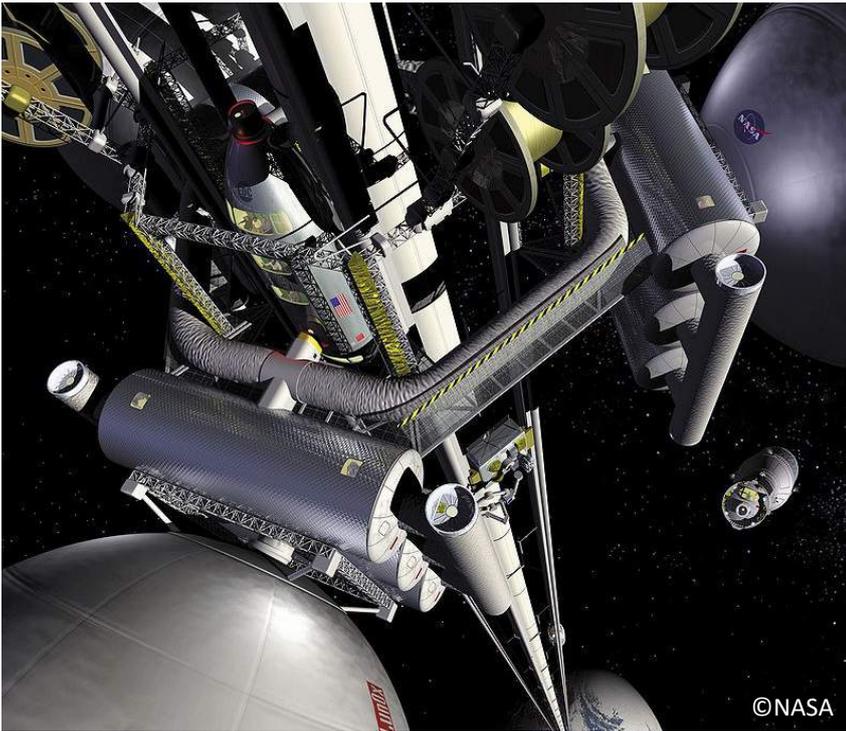


Fig. 2 - NASA Space Elevator (étude Smitheman).

**2. Point de libration (ou point de Lagrange) :** position de l'espace où les champs de gravité de deux corps en mouvement orbital l'un autour de l'autre, et de masses substantielles, fournissent exactement la force centripète requise pour que ce point de l'espace accompagne simultanément le mouvement orbital des deux corps. **Dans le cas où les deux corps sont en orbite circulaire, ces points représentent les endroits où un troisième corps, de masse négligeable, resterait immobile par rapport aux deux autres,** au sens où il accompagnerait à la même vitesse angulaire leur rotation autour de leur centre de gravité commun **sans que sa position par rapport à eux n'évolue.** Ces points interviennent dans l'étude de certaines configurations d'objets du système solaire et dans le placement de divers satellites artificiels.

**5. NIAC :** NASA Institute for Advanced Concepts.

-nautica, Jérôme Pearson (longtemps ignorant du projet resté confidentiel de Artsutanov) propose d'adopter une structure en forme de deux longs rubans, de part et d'autre d'un satellite en orbite géostationnaire. Une extrémité joue le rôle de contre-poids, qui évite d'arrimer trop solidement la base terrestre de l'ouvrage. Depuis l'extrémité du câble on peut atteindre n'importe quel point du système solaire. La hauteur totale de cette « tour orbitale » fait 144 000 kilomètres (40 % environ de la distance Terre – Lune). Le câble subit les conditions météorologiques, dans l'atmosphère. Pearson identifie deux zones géographiques idéales pour la construction (Sri Lanka et Galapagos), par l'étude des premiers modes oscillatoires du câble et des points de libration<sup>2</sup> de l'orbite géostationnaire 75°E, 105°W. Il calcule aussi les vitesses théoriques des cabines desservant l'ascenseur. Le projet s'avère inenvisageable de par les quantités de matériau à acheminer, et sa nature (diamant pour la résistance et pour garder un diamètre raisonnable au niveau géostationnaire : la « hauteur caractéristique » d'un matériau permet de déduire le rapport d'épaisseurs entre celle sur GEO<sup>3</sup> et celle sur Terre). En 1978, le romancier britannique Arthur C. Clarke dévoile le concept au grand public dans son roman de science-fiction « Les Fontaines du paradis » et y analyse tous les pro-

blèmes associés.

Le premier problème de faisabilité étant lié au matériau, la synthèse par le japonais Sumio Iijima en 1991 de nanotubes de carbone dérivés des fullerènes<sup>4</sup>, larges de quelques nanomètres, 30 à 60 fois plus résistants que le meilleur acier, 6 fois moins denses et au module d'élasticité 5 à 10 fois meilleur que l'acier, constitue une révolution et semble rendre envisageable le projet d'ascenseur spatial : résistance exceptionnelle de 200 Gpa (pour 70 Gpa requis), avec une production mondiale suffisante sous réserve de réussir à fabriquer des tresses à base de nanotubes suffisamment longues et résistantes (5 km maximum «seulement» actuellement avec un chargement en CNT de 1 à 5%).

Dans cette conception moderne de l'ascenseur spatial, la NASA mène en 2000 une étude exhaustive publiée par D.V. Smitherman («Space Elevators : An Advanced Earth-Space Infrastructure for the New Millennium », figure 2) ; un long câble s'étend de la Terre vers l'Espace, avec le centre du dispositif en orbite géostationnaire, et des véhicules à propulsion électromagnétique se déplacent le long du câble. Un astéroïde pourrait être capturé pour faire contrepoids.

En parallèle en 2000 puis 2003, deux rapports de Bradley Edwards pour le compte de la NIAC<sup>5</sup> présentent un projet avec un ruban plat de 110.000 km tressé en fibres de nanotubes de carbone, le long duquel montent des cabines d'une grande capacité de 20 tonnes (dont 13T de charge utile) s'agrippant au câble à l'aide de « crawlers ». Le câble s'étend entre l'es-

**3. GEO :** orbite géostationnaire.

**4. Fullerène :** 3ème forme du carbone, molécule découverte en 1985, composée de carbone pouvant prendre une forme géométrique rappelant celle d'une sphère, d'un ellipsoïde, d'un tube ou d'un anneau. Les fullerènes sont similaires au graphite, composé de feuilles d'anneaux hexagonaux liés, mais contenant des anneaux pentagonaux et parfois heptagonaux, ce qui empêche la feuille d'être plate. Les **nanotubes de carbone (CNT)** sont des fullerènes composés d'un ou plusieurs feuillets d'atomes de carbone enroulés sur eux-mêmes formant un tube.

# L'ascenseur spatial : mythe ou réalité ?

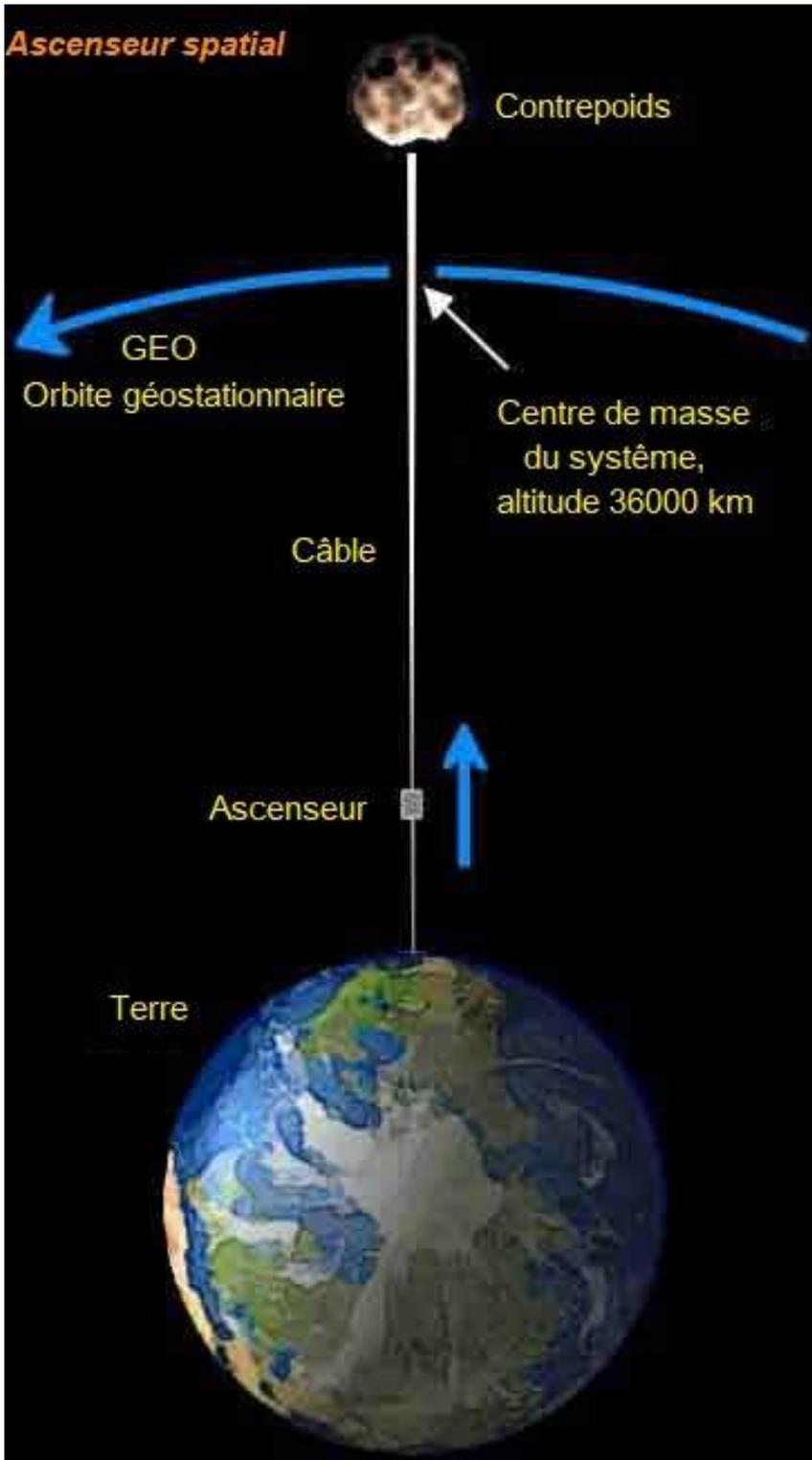


Fig. 3 - Le concept d'ascenseur spatial.

6. ISEC : International Space Elevator Consortium.

pace et un ancrage flottant mobile situé dans le Pacifique, sur l'équateur. Le design du câble le rend tolérant aux petits impacts, et sa largeur varie selon l'altitude en fonction des écueils rencontrés (vents forts, débris...).

L'ascenseur sera alimenté pour les 50 premiers kilomètres par une centrale électrique au sol transmettant l'énergie par faisceau laser. Ensuite, des panneaux pho-

tovoltaïques prendront le relais ; passée l'orbite géostationnaire (36000 km), la force centrifuge garantit à elle seule l'ascension ; arraché à l'attraction terrestre, l'ascenseur accumule de plus en plus d'énergie au fil de sa « montée », ce qui lui donne un fort potentiel pour l'exploration dans tout le système solaire. Pour un coût de développement de 10 G\$ sur 15 ans, le faible coût opérationnel de 250 \$ par kilo pourrait concurrencer les fusées. La phase 2 de l'étude améliore tous les points critiques du projet, notamment l'effet des crawlers sur la dynamique du câble. Suite à cette étude Edwards a depuis fondé sa start-up.

Depuis 2004, de nombreux travaux de recherche hors agences continuent d'étudier le projet d'Edwards ; en 2013, Peter A. Swan signe un rapport d'étude pour l'ISEC<sup>6</sup> synthétisant d'importantes modifications apportées au concept. Notamment, 590.000 m<sup>2</sup> de panneaux solaires remplaceront le faisceau laser, les caractéristiques du câble ont été précisées, l'implantation géographique idéale se situerait près des Iles Galapagos. Beaucoup de détails techniques sont avancés mais tous ne semblent pas crédibles.

Géant japonais du bâtiment, la firme Obayashi (figure 1) annonce en 2014 un projet d'ascenseur spatial (qui s'avère plus un « coup » publicitaire) mais sans dossier technique associé. Une petite expérience orbitale est tout de même financée en 2018, mise au point par l'université Shizuoka, et déployée depuis l'ISS, tentant le déplacement d'un mobile figurant la « cabine » entre 2 cubesats reliés par 10 m de câble d'acier.

Le concept actuel d'ascenseur spatial (figure 3), s'il ne semble plus irréalisable, se heurte à de nombreux problèmes potentiels à résoudre.

L'environnement externe génère divers problèmes, à commencer par les phénomènes atmosphériques. Sous l'effet du vent, des vibrations se propageront le long du câble entraînant fragilité (notamment à l'entrée en résonance) et difficulté à l'utilisation. Un amortissement actif sera à prévoir. La foudre est également à éviter.

Entre 60 et 800 km d'altitude, l'oxygène atomique très agressif entraînerait l'érosion du câble ; un revêtement de 25 µm de nickel le protégera.

# L'ascenseur spatial : mythe ou réalité ?

7. SPS : Space Power Stations.

8. EuSEC : European Space Elevator Challenge.

Dans l'Espace ensuite, il faudra juguler les dégâts dus à l'impact quotidien des débris orbitaux : les réparations de "petits" impacts seront continues ; concernant les gros débris on devra effectuer un évitement statique (par la gestion du point d'ancrage) et dynamique (utilisation des modes propres du câble).

Au-delà de la magnétopause, le câble de nanotubes pourrait se charger électriquement et conduire ces particules chargées vers la Terre.

L'orbite géostationnaire n'est pas stable : le maintien en position du "centre" du dispositif nécessitera des manœuvres de correction d'orbite dans les deux directions nord-sud et est-ouest, opérations significativement consommatrices d'ergols qu'il faudra acheminer en GEO<sup>3</sup>. Les problématiques vibratoires nécessiteront un amortissement (entre autres au niveau de la plate-forme d'ancrage).

Sur un plan mécanique, les pièces (crawlers notamment) devront tenir la sollicitation sur de très longs déplacements (80.000 km) ; il faudra pouvoir fournir les puissances nécessaires : 20 MW par crawler, cela équivaut à 2 TGV. Quant au câble, il peut présenter des fragilités structurelles (vides atomiques) mais aussi liées au tressage, ainsi qu'à la compression subie au passage des crawlers.

En plus des difficultés de réalisation technique, d'autres problématiques existent, liées aux conséquences sur l'environnement terrestre, telles que la nocivité des nanotubes de carbone pour la santé, le danger d'une retombée d'un câble accidentellement sectionné ou les risques de sabotage.

Quant aux coûts à l'utilisation révolutionnaires affichés (250 \$/kg à comparer à 15.000 \$/kg avec un lanceur), avec tant d'inconnues ils pourraient être très sous-estimés, sans compter la maintenance et les réparations.

Une fois posées les nombreuses problématiques à résoudre, le concept d'un ascenseur spatial, défi technologique, s'avère être un véritable booster pour de nombreux travaux de recherche et d'innovation. S'ensuit la création de très nombreuses start-ups, un travail important sur la transmission d'énergie à distance (intervention robotique en milieu dangereux avec déport de la source d'énergie, travaux proches de ceux des SPS<sup>7</sup>, con-

cepts récents similaires sur les lanceurs par Escape Dynamics) ; le concept inspire aussi le domaine des transports sur la propulsion de funiculaires ou les téléphériques ; on imagine des solutions de déploiement de câbles pour réparer les suspentes de ponts...

La motivation est également extrême au niveau des étudiants dans le monde entier et s'exprime dans les travaux universitaires et dans les concours tels les Space Elevator Games sponsorisés par la NASA lors de la X-Prize Cup, ou encore l'EuSEC<sup>8</sup> pour l'Europe.

En conclusion, d'un côté, les avancées révolutionnaires sur les matériaux avec les nanotubes de carbone et plus récemment les graphènes, les solutions envisageables (avec le laser) de transfert de l'énergie sur longue distance, les études sur la dynamique du câble, sur l'environnement externe, et sur un ascenseur lunaire ne font pas apparaître a priori de point bloquant au concept d'ascenseur spatial. D'un autre côté, l'intérêt économique est encore incertain avec un bilan financier peu fiable ; quant à l'utilisation d'un tel dispositif, l'évitement ou la tenue aux impacts de débris orbitaux restent à ce jour des problèmes non solutionnés. Alors, « ascenseur spatial, mythe ou réalité ? » : citons avec Christophe Bonnal la réponse de Sir Arthur C. Clarke : « L'Ascenseur Spatial se fera 50 ans après que les derniers se seront tus ».

CR

**Christophe Bonnal**, est expert sénior à la direction des lanceurs du CNES. Membre de la délégation française auprès des instances internationales en charge des débris, il préside les commissions « débris spatiaux » de l'Académie internationale d'astronautique (IAA) et de la Fédération Internationale d'Astronautique (IAF). Il est auteur de l'ouvrage "**Pollution Spatiale : l'État d'Urgence**" : édition Berlin, ISBN 978-2701157924, 2016.

Par **Denis Gély** (*Expert Acoustique, ancien directeur du département Acoustique de l'ONERA & président du CEAS/ASC\**)

**Mardi 2 Juillet 2019 de 18h30 à 20h**

Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris (Métro Vaugirard)

\*CEAS: Council of European Aerospace Societies ; ASC : Aeroacoustics Specialists Committee



Fig. 1 - La sensation de gêne sonore est une notion subjective. Le **bruit des avions** est perçu comme plus gênant que les autres moyens de transport.

**1. EPNdB (Effective Perceived Noise in decibels)** : unité de base permettant d'exprimer le niveau effectif de bruit perçu. Il est utilisé pour la certification acoustique des avions à réaction (normes OACI).

Lors de cette conférence, Denis Gély a montré que le bruit des avions, aujourd'hui perçu comme nuisance sonore, est désormais pris en compte par tous les acteurs du transport aérien. Il a présenté un panorama des progrès accomplis, des verrous restant à lever et des solutions encore envisageables grâce aux progrès de la recherche dans le domaine des nouvelles technologies et des architectures des avions.

En préambule, une présentation de l'ONERA nous rappelle que, principal centre de recherche français des secteurs aéronautique, spatial et défense avec 2000 collaborateurs répartis sur 8 centres et un budget de 235 M€, cet EPIC fondé en 1946 intervient dans de nombreux programmes aéronautiques et spatiaux tels Ariane, Falcon, Rafale, projets d'Airbus, missiles, hélicoptères, moteurs, radars. Pour ce faire, l'ONERA dispose de moyens d'essais et de calcul importants, et notamment du plus grand parc de souffleries d'Europe.

Historiquement, le développement du transport aérien public se fait dans les années 60 avec la mise en service par la compagnie aérienne Pan Am du Boeing 707 et du Douglas DC-8. En Europe, nous

gardons souvenir de la Caravelle, construite par le français Sud-Aviation. Avec une technologie simple flux, les moteurs d'avion (Avon/RR) sont alors très bruyants. L'aéroport est pourtant perçu comme un lieu de curiosité touristique, avec 4 millions de visiteurs à Orly en 1965. De nos jours, avec un trafic sans commune mesure et en progression constante, le contexte est tout autre : fortement imprégnée des enjeux environnementaux, la recherche se concentre sur des carburants alternatifs, la réduction des émissions polluantes, et la réduction du bruit et des nuisances associées.

L'idée d'une réglementation sur le bruit des avions émerge dès les années 60 ; des comités sont créés pour gérer les problèmes environnementaux, tels le Committee on Aviation Noise (CAN) en 1965, puis le Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP) en 1983. Créée en 1944 par la ratification de la Convention de Chicago par 54 pays, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), dont les efforts de régulation portent essentiellement sur une réduction du bruit à la source, prévoit des normes de certification acoustiques, précisées au Chapitre 16 Volume 1 (« Bruit des aéronefs »). Les avions à réaction de première génération (B707 et DC-8), dénommés Sans Certification Acoustique (SCA), en étaient exemptés. Les chapitres 2 à 4, entre 1960 et 2017, font évoluer ces normes. En 2017 le Comité de la Protection de l'Environnement en Aviation (CAEP) de l'OACI a fait adopter une nouvelle norme de certification acoustique des aéronefs, dénommée « Chapitre 14 » et représentant une réduction de bruit de 7 EPNdB<sup>1</sup> comparé au Chapitre 4.

Depuis 2001, l'OACI définit 4 leviers d'action (principe de « l'Approche Équilibrée » de la gestion du bruit des aéronefs) : réduction du bruit à la source, adaptation des procédures opérationnelles, restrictions à l'exploitation des aéronefs, planification et gestion de l'utilisation des

# Le bruit du transport aérien

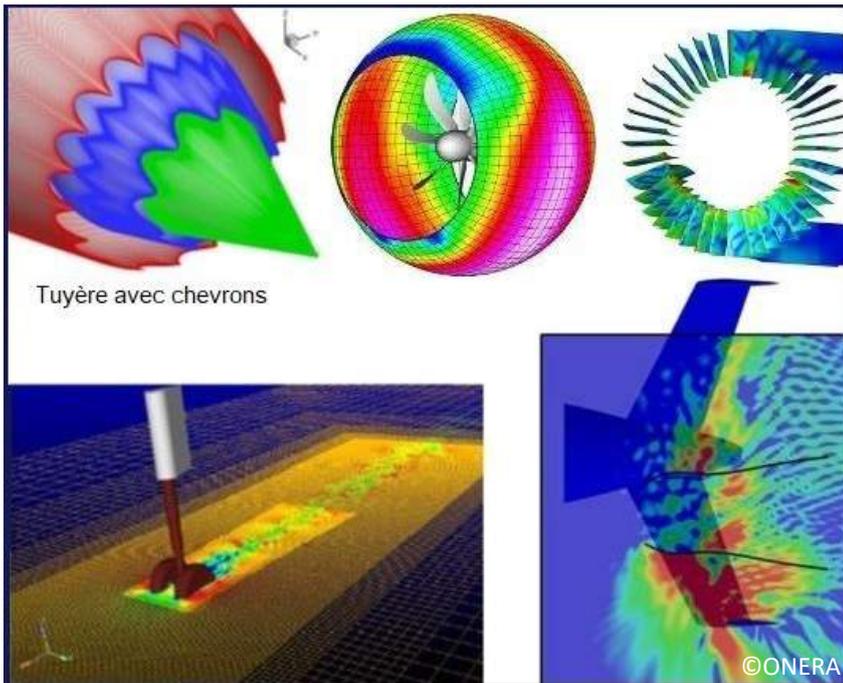


Fig. 2 - Exemples de modélisation aéroacoustique.

## 2. CFD pour Computational Fluid Dynamics

: simulation numérique des écoulements, ou mécanique des fluides numérique. La CFD consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations (de Navier-Stokes) régissant le fluide. La CFD permet l'accès à toutes les informations instantanées (vitesse, pression, concentration...) pour chaque point d'un domaine de calcul.

## 3. CAA pour Computational Aero-Acoustics

: aéroacoustique numérique. L'aéroacoustique désigne l'étude des phénomènes acoustiques liés à des écoulements aérodynamiques. La CAA consiste à étudier par des méthodes numériques le rayonnement du bruit d'une source aéroacoustique, ou la propagation d'ondes sonores dans un écoulement.

## 4. RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes equations

: moyennage temporel des équations de Navier-Stokes.

terrains (limitation des populations près des aérodromes).

Le « bruit à la source », au niveau aéronef, est l'addition de plusieurs composantes générées par les moteurs, le fuselage, le train (et trappes) d'atterrissage, les hypersustentateurs (becs, volets), qui varient selon les phases du vol. Concernant les moteurs notamment : toutes les parties du réacteur (soufflante, compresseur, chambre de combustion, turbine), et le jet participent au bruit produit. Pour les réacteurs double-flux (années 60), pendant une trentaine d'années, l'essentiel de la réduction du bruit moteur est dû à l'augmentation du taux de dilution (BPR). Dans la recherche de réduction du bruit en modifiant les éléments des moteurs, trains... des aéronefs, notons que traiter la source dominante du bruit fait émerger des sources secondaires.

Le bruit d'origine aérodynamique est produit par les écoulements turbulents, on cherche donc à revisiter les composants des moteurs, trains, etc... pour en limiter leurs effets. Dans cet objectif de limitation sonore, le travail de l'acousticien consiste à prédire par la modélisation le bruit rayonné par les écoulements autour des pièces considérées et valider les optimisations proposées. La modélisation acoustique comprend notamment la CFD<sup>2</sup> et la CAA<sup>3</sup>. Pour la modélisation, un système de maillage complexe vient entourer la pièce considérée. La prise en compte des écou-

lements se fait majoritairement par la méthode RANS<sup>4</sup>. La validation expérimentale s'effectue sur des bancs de recherche et d'essais, puis par des mesures au sol lors d'essais en vol. Pour les vérifications en soufflerie, à l'ONERA, la soufflerie «anéchoïque» (en chambre sourde) CEPRA 19 permet notamment de localiser les sources acoustiques par des techniques d'antennerie.

Les principales modifications pour limiter le bruit des réacteurs concernent le jet (il s'agit de modifier le développement des structures turbulentes, de favoriser le mélange, et de réduire les gradients de vitesse et de température), la soufflante (on peut modifier la forme des aubes, réduire les vitesses périphériques, intégrer les redresseurs du flux secondaire dans les bras structuraux), la nacelle (il faut maximiser l'installation de liners - matériaux absorbants acoustiques - en parties amont et aval ; on optimise aussi avec des formes biseautées) et les effets d'installation (il s'agit de profiter des effets d'écran de la voilure, de la cellule).

Pour limiter efficacement l'impact du bruit des transports aériens sur les personnes, il ne suffit pas de prendre en compte la réduction du bruit effectif par des améliorations techniques. Entre ainsi en jeu la notion de gêne sonore, qui est subjective. L'indicateur énergétique le plus connu, car utilisé dans la réglementation française, est le LAeq (niveau continu équivalent exprimé en dB(A)) qui correspond au niveau sonore moyen sur une période déterminée. Néanmoins, à niveau équivalent, le même bruit sera perçu plus gênant la nuit que le jour. Il a donc été créé un indicateur global harmonisé à l'échelle européenne tenant compte de cette différence de perception : le Lden<sup>5</sup>.

L'indicateur Lden n'est néanmoins pas considéré comme représentatif de la gêne sonore. L'étude de celle-ci doit également

**5. Lden - Leq day, evening, night** : cet indicateur est calculé sur la base des niveaux équivalents sur les trois périodes de base : jour, soirée et nuit, auxquels sont appliqués des termes correctifs majorants, prenant en compte un critère de sensibilité accrue en soirée et plus encore la nuit. Il est notamment utilisé dans l'élaboration des Plans d'Exposition au Bruit (PEB) des aéroports.

# Le bruit du transport aérien



Fig. 3 - Carte de bruit au sol.

prendre en compte d'autres paramètres. Ainsi, à intensité sonore équivalente, le bruit du transport aérien est perçu comme plus gênant que celui d'autres modes de transport. La répétition des perturbations les rend aussi moins supportables. La durée, la soudaineté, et la nature du spectre sonore rendent le bruit plus ou moins désagréable. De cette notion de confort/inconfort est née celle de design sonore. Pour évaluer la gêne, de nombreux tests recueillent le ressenti des personnes en situation. Le module logiciel Carmen développé par les acousticiens de l'ONERA simule le bruit des avions au sol par la modélisation des sources de bruit de l'aéronef, des effets d'installation et de la propagation acoustique dans la basse atmosphère. Carmen simule le spectre de bruit au cours de la trajectoire, et une synthèse sonore est générée. Le bruit restitué d'une flotte d'avions par exemple peut ainsi être évalué par des auditeurs. Carmen a été validé par confrontation avec des résultats d'essais en vol.

Le défi se poursuit en matière de réduction du bruit de l'aérien. Les objectifs proposés en 2000 par l'ACARE<sup>6</sup> (-50% EPNdB pour 2020) sont devenus encore plus ambitieux (-65% EPNdB pour 2050). Dans le cadre du programme Horizon 2020 (H2020) de la Commission européenne, l'ONERA a été retenu en 2017 pour 3 projets européens de recherche collaborative sur la réduction du bruit.

Sous la coordination de l'ONERA, le projet ANIMA (Aviation Noise Impact Management through novel Approaches) doit identifier les bonnes pratiques et proposer aux aéroports des solutions innovantes

**6. ACARE** - Advisory Council for Aviation Research and innovation in Europe.

pour réduire la gêne ressentie par les riverains, en prenant notamment en compte les facteurs non acoustiques de la gêne (conviction que le bruit pourrait être évité, non confiance dans le discours des autorités, voire sentiment d'abandon).

- Le projet ARTEM (Aircraft noise Reduction Technologies and related Environmental IMPact) est dédié aux nouvelles technologies et nouvelles configurations d'aéronefs .
- Le projet RUMBLE (RegULation and norM for low sonic Boom LEvel) sur les normes et la réglementation du bang sonique est coordonné par Airbus Group en coopération avec des partenaires russes.

Pour finir, un progrès significatif dans la réduction du bruit à la source impliquera de développer de nouvelles architectures pour les aéronefs et des technologies de rupture.

CR



Fig. 4 - Concept ONERA NOVA (NextGen Onera Versatile Aircraft) pour aller plus loin en termes d'économie de carburant, d'émissions polluantes et de bruit ; parmi les innovations de rupture, on prévoit l'ingestion de la couche limite au niveau des moteurs.

## Aérodynamique et Consommation des TGV : comment optimiser la première pour réduire la seconde ?

Par Laurent Baron (*directeur technique des plateformes « Mainline & Locomotive » chez Alstom*)

Mardi 24 Septembre 2019, de 18h30 à 20h. Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris



Fig. 1 - AGV, Automotrice à Grande Vitesse, construite par Alstom, © Alstom.

**D**epuis de nombreuses années, Alstom travaille à l'optimisation aérodynamique des Trains à Grande Vitesse pour réduire leur consommation électrique. Lors de cette conférence, Laurent Baron a présenté et analysé les paramètres d'influences aérodynamiques (géométries, vent traversier, profils des tunnels...) du ferroviaire et leurs incidences sur la consommation énergétique.

Pour étudier l'aérodynamique dans le domaine du ferroviaire, on commence par prendre en compte les lois fondamentales de la physique; s'appliquent donc les lois de Newton, les lois de la conservation de la masse et de l'énergie, et les formules de la mécanique des fluides. Les outils numériques de simulation utilisés sont TransTun pour le calcul des ondes de pression, et les logiciels 3D Star CCM+ et Powerflow pour l'analyse numérique de la dynamique des fluides. La validation en souffleries se fait usuellement à Saint-Cyr (souffleries de l'IAT) et à Nantes (soufflerie climatique du CSTB), ainsi qu'à Cologne (soufflerie cryogénique KKK du DNW) pour les conditions les plus extrêmes (haute Vitesse 470 km/h /basses températures, avec T° entre 100K et 200K). Dans l'optique d'une standardisa-

tion européenne du traitement des problématiques aérodynamiques ferroviaires, ALSTOM Transport ainsi que la SNCF ont contribué à l'élaboration de la norme EN14067; Elle détermine entre autres les méthodes pour statuer sur la conformité du matériel roulant vis-à-vis des STI (Spécifications Techniques pour l'Interopérabilité ferroviaire européenne). L'EN14067 décrit les phénomènes physiques de l'aérodynamique ferroviaire et donne des recommandations pour la documentation des essais. L'aérodynamique ferroviaire présente quelques problématiques spécifiques en particulier pour la grande vitesse, comme la résistance à l'avancement, les effets de souffle, la susceptibilité aux vents traversiers, le confort tympanique en tunnel, le bruit aérodynamique, et les envois de ballast.

L'effet de souffle désigne les effets des variations de pression et de vitesse de l'air au passage d'un train. La tête du train produit les plus fortes variations de pression, et l'arrière du train produit les plus fortes variations de vitesse de l'air. Ces variations produisent des efforts sur les passagers sur un quai, sur les ouvriers le long de la voie et des contraintes sur l'infrastructure proche des voies; ces effets devront donc être limités par la conception et par l'exploitation du train pour ne pas mettre en danger les personnes et pour préserver les infrastructures.

Lors du croisement entre deux trains (croisement à l'air libre), les charges aérodynamiques sont appliquées sur les faces internes du croisement et leur amplitude (Pmax-Pmin) décroît quand l'entraxe des voies augmente. L'étude du croisement sera dimensionnante dans les calculs pour assurer la tenue des structures sur leur durée de vie (30 ans).

La tenue aux vents traversiers est également une problématique critique, car l'effet du vent conduit à des déchargements de roues pouvant aller jusqu'au renversement du train. Les calculs à dif-

# Aérodynamique et Consommation des TGV

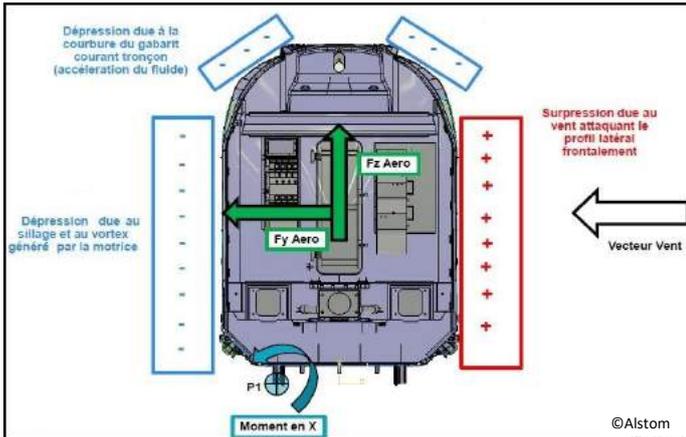


Fig. 2 - Champs de pression dus aux vents traversiers.

différentes vitesses et angles d'attaque du vent la plus sensible (motrice ou voiture d'extrémité pour un TGV) mèneront à des limitations de vitesse en exploitation

(vitesse réduite dès 110km/h de vent et arrêt dès 130 km/h pour les endroits exposés). La validation se fera exclusivement en soufflerie.

Les effets aérodynamiques entre la voie et le train à grande vitesse peuvent conduire à des efforts sur les pierres de ballast tels que ces dernières décollent et endommagent les sous-châssis des trains. On mesure l'effet du train sur la voie à l'aide de capteurs permettant de caractériser le risque de décollement. La réduction du risque s'assure par un capotage continu des sous-châssis et par la fermeture des césures entre véhicules.

L'aérodynamique ferroviaire implique de considérer les contraintes qui s'appliquent lors du passage en tunnel. La mise en œuvre du TGV Atlantique a mis en lumière un phénomène d'ondes de pression produites par l'entrée du train en tunnel. A cet instant, la tête du train produit des ondes de compression, quand la queue du train produira des ondes de détente. Ces ondes se reflètent sur les portails d'entrée et de sortie du tunnel. Leur amplitude dépend de nombreux paramètres (section, revêtement, longueur du tunnel, forme, longueur et vitesse du train...) et la

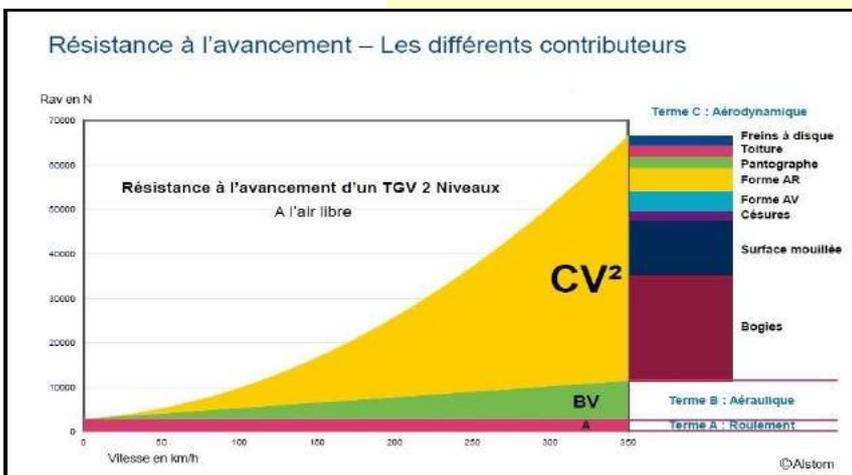
pression dans le tunnel varie en fonction de l'avancement du train dans celui-ci. Les ondes de pression génèrent une sollicitation des structures, des baies, des portes... et de la fréquence de passage en tunnel prévue dépendra donc également leur dimensionnement.

Du point de vue du passager, et malgré la grande étanchéité des rames du TGV, un inconfort tympanique peut être ressenti par certains voyageurs. Notamment, la pression intérieure dans la rame suit un profil similaire à la pression extérieure au passage en tunnel. Dans certaines conditions, un boom sonique est généré au niveau de la sortie du tunnel. Un redesign du train peut limiter cet effet (comme le nez rallongé sur les Shinkansen).

La résistance à l'avancement est un paramètre clé d'un TGV. Plus cette valeur est faible et moins la rame consommera d'énergie pour se maintenir à très grande vitesse. Cet effort résistant s'oppose à l'avancement du train. La résistance à l'avancement prend en compte la résistance au roulement (fonction du nombre de boggies et de la masse à l'essieu), les effets aérodynamiques proportionnels à la vitesse et les effets aérodynamiques autour de la rame proportionnels au carré de la vitesse. Elle est majorée au passage en tunnel. Pour la limiter, il s'agira de diminuer la trainée de forme (design plus aérodynamique de la motrice, carénage des boggies, limitation des cavités et des césures inter-caisse, contrôle actif local de l'écoulement par aspiration / soufflage) et autant que possible la trainée de frottement (optimisation des surfaces).

Tous ces perfectionnements techniques font du TGV un moyen de transport économique, avec un coût par passager très réduit (1,44 €/passager pour un trajet Paris-Nice de près de 1000 km, contre 25,6 €/passager pour un trajet à 5 en voiture). Le rapport coût/énergie utilisée est très avantageux, avec une recherche permanente d'optimisation en améliorant l'aérodynamique et en diminuant la résistance à l'avancement (optimisations sur les boggies). D'autres stratégies sont efficaces comme l'optimisation du volume intérieur de la rame (en duplex pour plus de passagers), une gestion de conduite optimisée par le conducteur du train, ainsi que la récupération d'énergie au freinage.

Fig. 3 - Résistance à l'avancement : les différents contributeurs.



CR

Par Richard Heidmann (*fondateur et vice-président de l'association Planète Mars, section française de la Mars Society*)

et Aline Decadi (*administratrice et responsable communication de Planète Mars*)

Mardi 12 Novembre 2019 de 18h30 à 20h. Mairie du XVème arrondissement, 31 rue Péclet – 75015 Paris



Fig. 1 - Simulation de mission martienne AMADEE-18 dans le désert d'Oman, © APM/OeWF.

Lors de cette conférence passionnante ayant captivé un auditoire varié, dont des élèves de l'École Supméca, Richard Heidmann et Aline Decadi se sont succédés pour une présentation en deux volets : l'un plus théorique, abordant l'aspect technique avec les projets de lanceurs lourds ; et un second volet d'application pratique, avec la présentation de l'expérience de simulation analogue AMADEE-18 qui s'est déroulée dans le désert d'Oman, en février 2018 et d'une durée de 5 semaines dont 4 de simulation, afin de se confronter à des conditions extrêmes assez représentatives de futures missions sur Mars. Une centaine de personnes de 25 pays différents ont participé à cette expérience.

De nos jours, les agences manifestent la volonté de relancer l'exploration spatiale humaine ; les motivations politiques, inchangées, visent à accroître les connaissances, soutenir l'innovation, rallier la jeunesse aux professions techniques, et

bien évidemment renforcer son influence géostratégique.

La posture des Etats-Unis est déterminante ; elle est positive mais peu cohérente, et sous-financée.

Parmi les moyens à développer, un lanceur « super lourd », comme ceux développés dès les années 60 tels la Saturn V lunaire, capable de mettre en orbite terrestre basse (LEO, Low Earth Orbit) au moins cent tonnes, est incontournable ; aucun lanceur actuel ne peut le faire, et malgré un certain nombre de projets actuels, les agences ne priorisent pas ces projets coûteux et manquant de retombées commerciales.

La nécessité d'un lanceur lourd pour les missions habitées vers Mars est liée à plusieurs facteurs : l'équipage devra y disposer de capacités scientifiques avancées, donc d'équipements conséquents, d'un large panel d'expertises y-compris en médecine ou électronique par exemple, faisant monter classiquement à six l'effectif minimal de l'équipage. La durée de la mission sera de 6 mois de voyage, 18 mois sur place le temps que les planètes se réalignent dans une configuration favorable, et 6 mois pour le trajet de retour, en emportant la quantité de vivres et d'équipements de base très conséquente nécessaire et ce dans un espace de vie au confort adéquat pour les personnes sur une telle durée. Important également, pour assurer le voyage retour, l'impulsion de vitesse ( $\Delta v$ ) à donner au vaisseau pour le retour vers la Terre est beaucoup majorée comparé à la Lune, dû au champ de gravité bien supérieur. Avec l'hypothèse d'envoyer des modules de 30 à 50T, la capacité du lanceur doit donc être de l'ordre de 100T.



PLANETE MARS

[planete-mars.com](http://planete-mars.com)

# L'Homme sur Mars: les préparatifs

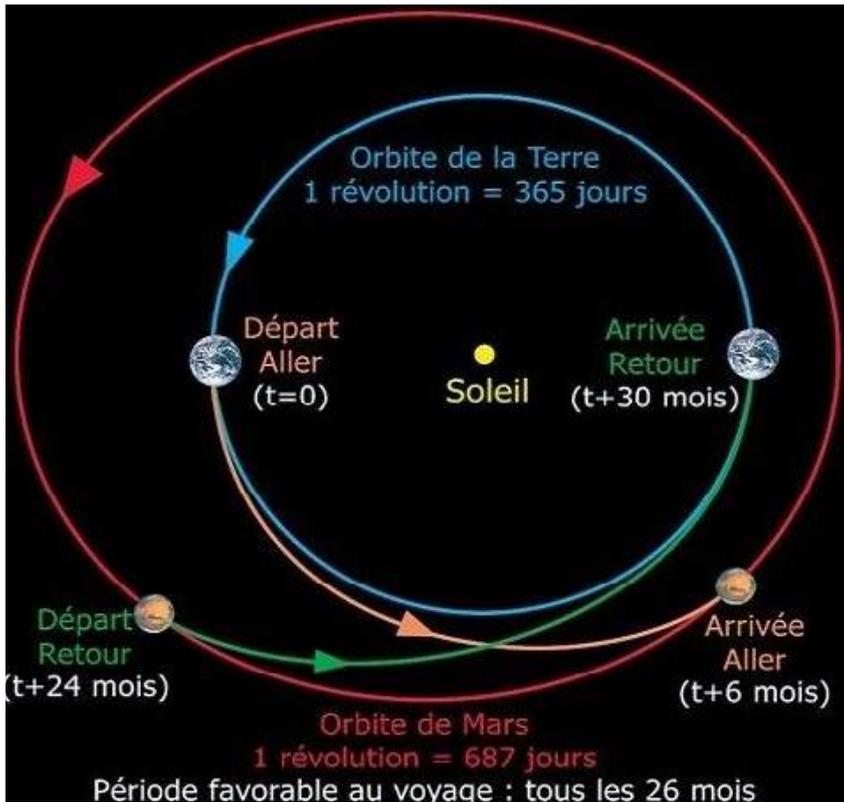


Fig. 2 – Mission de type « conjonction », © APM/OeWF.

## Trajectoires et mécanique céleste

Le schéma ci-dessus, avec en orange la trajectoire « Aller » Terre-Mars (6 mois), et la position de la Terre à l'« Arrivée » sur Mars, illustre les raisons de la durée de la mission, car il faut attendre 18 mois que Mars soit revenu à la position « Départ » pour envisager le trajet de retour (en vert), d'une durée de 6 mois également. Ce schéma (mission de type « conjonction ») réduit la durée du voyage avec un coût énergétique faible (trajectoire de Hohmann) donc une moindre quantité d'ergols à transporter. Une solution alternative (mission de type « opposition ») a été envisagée, qui réduirait la présence sur Mars à seulement 30 jours.

## Architectures de mission : 1969 : Mars post-Apollo

Depuis 1969, forts du succès lunaire, plusieurs projets de missions habitées vers Mars ont été envisagés. Von Braun lui-même tout d'abord, imagine un projet « all in one » sur le modèle Apollo, pour envoyer tout le matériel en un seul lancement, mais avec deux fusées en simultané pour assurer une redondance de sécurité; basé sur le développement d'une propulsion nucléaire, le projet jugé trop coûteux est rejeté par le Congrès US qui se satisfait de la suprématie sur l'URSS pour la conquête lunaire.

Durant 20 ans ensuite, aucun projet con-

cret de vol habité vers Mars ne voit le jour. En 1989, le président George H.W. Bush demande à la NASA un rapport sous 90 jours décrivant le meilleur moyen d'aller vers Mars afin de reprendre l'exploration spatiale habitée. La NASA reprend quelques idées de Von Braun et suggère une mission d'une incroyable complexité et au coût exorbitant de 400 milliards de Dollars. Le Congrès US réagit et interdit la moindre dépense sur ce projet.

En 1990 Robert Zubrin, fondateur de la Mars Society, et David Baker décrivent le projet révolutionnaire Mars Direct, abaissant radicalement les coûts, fondé sur les principes suivants : les vols aller et retour seront directs, l'équipage se limitera à un effectif de 4, la mission sera de type « split » (plusieurs fenêtres de tir au lieu d'un envoi en simultané) et la production des ergols de retour se fera à partir de ressources martiennes. La mission est donc

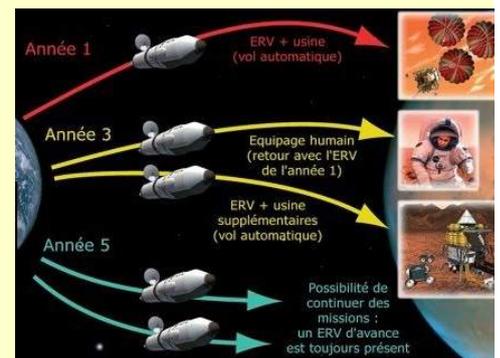


Fig. 3 - Principe de la mission « Split »; les missions peuvent se succéder, avec l'ERV en possible secours de la mission précédente.

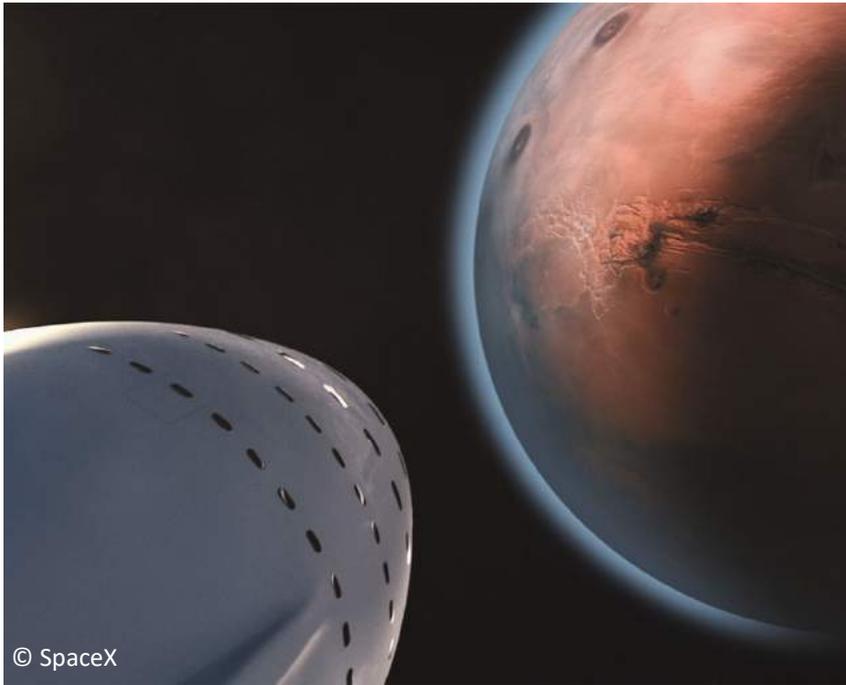
considérablement allégée avec seulement 2 vols d'un lanceur lourd « Ares » utilisant des moteurs Navette et capable de lancer 120T en orbite basse.

En 2006, se concrétisent les objectifs lancés par le président US George W. Bush en 2004 avec le programme Constellation d'établissement d'une base lunaire pour des missions de longue durée (dont l'objectif Mars), avec le développement de la capsule Orion et du lanceur lourd Ares, inspiré d'Apollo mais reprenant des traits de Mars Direct. Toutefois, alourdi et complexifié (7 lanceurs lourds à 1 milliard de \$, 8 éléments différents, propulsion nucléaire), le programme trop coûteux est stoppé en 2009 par Le président Obama. Le Congrès sauve cependant le développement d'Orion, et le projet de lanceur lourd SLS.



Fig. 4 - Aline Decadi & Richard Heidmann lors de la conférence.

# L'Homme sur Mars: les préparatifs



© SpaceX

Fig. 5 - Approche vers Mars. Vue d'artiste

## Les projets de lanceurs lourds

Cheval de bataille de la NASA, le SLS (Space Launch System), avec un premier vol prévu en 2021, sera développé en deux étapes, pour des raisons budgétaires: une version Block 1 d'une charge utile de 70T en orbite basse (pour la version la moins puissante), puis le Block 2, capable de 130T. Deux versions différentes qui au final reviennent bien plus cher. Depuis 12 ans, les retards, surcoûts, s'accumulent avec des bévues techniques handicapantes, aboutissant à un audit de la NASA en 2018 aux conclusions très sévères. La concurrence, en particulier de Space X et Blue Origin, se fait oppressante quant aux projets de lanceurs super lourds. Notons également dans le reste du monde le projet chinois Long March 9, avec une capacité de 140T, et le récent projet russe Yenisei, de 103T en LEO. En somme, l'obstacle majeur dans les différents projets tradition-

Fig. 6 - Super Heavy/Starship. Vue d'artiste, © SpaceX.



nels n'est pas la technique (Saturn V en aurait été capable), mais le coût !

Quelques précisions sur les projets en cours : le projet New Armstrong de Blue Origin, société de Jeff Bezos aux Etats-Unis, dispose de fonds très importants et d'une forte maîtrise technique, avec un moteur cryogénique cryo Be-4 développé en 3 ans. Concernant le programme chinois, avec la ferme volonté d'établir une base lunaire, une activité rationnelle et très fiable permet d'envisager un premier vol en 2030, et une présence durable dans le paysage spatial. Le programme russe Yenisei reste à observer, avec un aboutissement prévu en 2028 et un projet de base lunaire également.

Space X (fondée en 2002), représente une nouvelle révolution astronautique, avec notamment le premier lanceur (partiellement) réutilisable Falcon 9 mis en service en 2010, et une première récupération réussie fin 2015. L'on connaît les images du lanceur lourd Falcon Heavy en avril 2019 avec la triple récupération des boosters, les deux propulseurs d'appoint sur la base de lancement et l'étage central sur une plateforme mobile en mer. Des contrats NASA soutiennent l'essor de Space X avec notamment la capsule orbitale Cargo Dragon et ses missions de ravitaillement de la station ISS, et Dragon 2 (ou Crew Dragon) qui effectuera la relève des équipages de l'ISS dès 2020.

Le projet martien de Space X, révélé par Elon Musk en 2016 et détaillé à l'IAC (Congrès International d'Astronautique) de 2017, intègrera le lanceur Super Heavy/Starship (anciennement Big Falcon Rocket), lanceur super lourd totalement récupérable pour minimiser les coûts, composé de seulement deux éléments, un booster et un deuxième étage qui sera une navette utilisable pour le retour. Des tankers viendront ravitailler le vaisseau initialement placé en orbite terrestre afin d'assurer le voyage vers Mars. Les essais pourraient commencer en 2020 en fonction de difficultés liées à la propulsion.

Si Space X continue à faire ses preuves, un partenariat privé-public avec la NASA pourrait à l'horizon 2030 amener les Américains les premiers sur Mars, tandis que les Chinois auront établi leur base lunaire. L'Europe quant à elle risque de manquer le tournant du « New Space » et les promesses de profits associées.

## L'Homme sur Mars: les préparatifs



Fig. 7 - station de la simulation analogue martienne AMEED-18, © APM/OeWF.

Dans le deuxième temps de cette conférence, Aline Decadi nous a présenté une mission de simulation analogue réalisée en février 2018 pendant au total cinq semaines (dont quatre de simulation) dans la région de Dhofar, à Oman, en partenariat avec la Société Astronomique d'Oman. En effet, certains membres de l'association Planète Mars participent à des initiatives européennes visant à préparer les missions d'explorations martiennes (et lunaires également). L'objectif est d'émettre des rapports, de discuter avec les laboratoires de recherche et les agences spatiales pour faire évoluer les technologies en vue de l'exploration martienne. Pour cette simulation, une base a été montée de toutes pièces dans le désert, puis démontée en quelques jours en fin de mission. Certaines missions de simulation se concentrent essentiellement sur un confinement dans la base, afin d'étudier les réactions physiologiques et psychologiques à cette situation. Ici, en complément, les sorties extra-véhiculaires (EVA) ont été privilégiées, afin de tester des protocoles opérationnels sur le terrain à quelques km de la base. L'autre objectif spécifique à cette mission était de tester la combinaison Aouda développée par l'Austrian Space Forum (ÖWF, le centre

spatial national autrichien) d'un poids de 45kg (soulagé « sur Terre » grâce à un exosquelette), brevetée notamment pour son système de verrouillage du casque. C'est une combinaison autonome, en termes de batterie, de systèmes de communication et de survie (oxygène, capteurs d'état de santé) avec les redondances nécessaires.



Fig. 8 - Préparation des combinaisons (donning), © APM/OeWF.

Pendant la mission, la base est en contact permanent avec le support contrôle de mission (MSC) qui constitue l'interface avec la Terre. Il récupère quotidiennement les données des expériences qu'il retransmet aux laboratoires et agences partenaires qui eux-mêmes analysent pour ajuster les expérimentations à suivre. La distance avec la Terre est simulée par un délai dans les communications de 20 minutes pour un échange aller+retour, ce qui impose une relative autonomie sur la base. Le MSC assure en plus un support à distance pour l'antici-



Fig. 9 - Intervention en extérieur, © APM/OeWF.

# L'Homme sur Mars: les préparatifs



Fig. 10 - Casque de la combinaison Aouda, © APM/OeWF.

Page web dédiée à cette simulation: <http://planete-mars.com/simulation-amadee-18/>

Vidéos des expériences phares AMADEE-18 : <https://www.youtube.com/user/alinedecadi1>

La prochaine simulation se prépare : <http://oewf.org/en/portfolio/amadee-20/>

Association Planète Mars : <http://planete-mars.com/>

Adhérents 3AF, retrouvez l'intégralité de cette conférence en vidéo sur la chaîne YouTube 3AF-Groupe régional Ile De France : [https://youtu.be/\\_kzylunTjL8](https://youtu.be/_kzylunTjL8)

© APM/OeWF.



tion des risques et des besoins. L'équipe de terrain, 15 personnes, a déroulé une vingtaine d'expériences, principalement dédiées à des sorties extra-véhiculaires sur le terrain, et certaines à l'étude psychologique et comportementale.

Concernant la base : Les structures (non représentatives des besoins martiens) sont constituées de modules gonflables, autour d'un dôme central de 15m de diamètre s'articulent d'autres dômes avec un atelier mécanique, un service médical, une salle de sport, un lieu de stockage et de mise en œuvre du Rover et l'atelier d'impression 3D.

Le Rover Husky sert pour le mapping de reconnaissance du terrain. Autonome, il détecte au laser les zones dangereuses sur un parcours prédéfini. Un drone assure un mapping étendu en complément. Des zones favorables au recueil d'échantillons de roches sont déterminées, et les astronautes partent ensuite les collecter. Un radar de sous-sol permet également de détecter les propriétés diélectriques du sol et donc la présence de traces d'eau. D'autres expériences ont été présentées, qui portent par exemple sur une solu-

Fig. 12 - Utilisation d'un drone autonome en vue du mapping.

tion de localisation sans GPS, ou, de retour à la base, sur la culture hydroponique.

Concernant le donning ou préparation des combinaisons, deux heures quotidiennes sont nécessaires à leur mise en place et



Fig. 11 - Sortie extra-véhiculaire (EVA), © APM/OeWF.

remise en état opérationnel. Chaque soir elles sont défaits et leurs 200 connecteurs nettoyés.

## Le témoignage d'Aline sur la mission

**AMADEE-18** : « J'ai eu la chance de faire partie de l'équipe envoyée sur le terrain martien. Les expériences à dérouler étaient très diverses[...]Au sein de l'équipe « Field Crew », j'étais en charge d'effectuer les tâches nécessaires à la préparation et au bon déroulement des expériences :

-Préparation de la combinaison spatiale des astronautes (combinaison autonome contenant les systèmes de survie et de communication avec la base);

-Préparation des procédures à dérouler;

-Responsable sécurité de la mission;

-Opérateur en charge de la communication avec la TERRE.

J'ai donc été formée à tous ces postes en vue de cette mission. Il s'agit donc d'une expérience très polyvalente, où le mot d'ordre est TRAVAIL EN EQUIPE, RIGUEUR et ACHARNEMENT.

Cette expérience incroyable m'a beaucoup appris sur la préparation et le déroulement d'expériences scientifiques de terrain, en particulier le contenu technique des objectifs de mission. Les résultats de nos expériences ont permis de dégager des axes d'amélioration à prendre en compte pour les prochaines missions analogues en 2020. »

CR

# CONFÉRENCE

## Cinquantenaire de l'Accord AIRBUS

Par **Georges Ville** (ancien directeur financier d'Airbus puis chargé de la direction stratégique chez Aérospatiale)

**Mardi 17 décembre 2019 de 18h30 à 20h00**

Mairie du XV<sup>ème</sup> arrondissement, 31 rue Pécelet – 75015 Paris (Métro Vaugirard)

The flyer features the 3AF logo and the title 'Les Conférences du Groupe Ile-de-France'. It highlights the 50th anniversary of the Airbus agreement and lists the speaker, Georges Ville, with his credentials. It provides the date and time of the event (December 17, 2019, 18h30-20h) and the location (Mairie du XV<sup>ème</sup> arrondissement). A photograph shows a group of people at a conference. Text at the bottom includes contact information and a calendar of other 3AF events.

**G**eorges Ville a consacré sa vie professionnelle au service d'Airbus, en plusieurs « temps » marqués chacun par la pratique d'un domaine d'action fondamental.

**1962-1974 : 1er challenge : la définition de l'avion et le lancement de la coopération.** En 1962 à sa sortie de Supaéro en tant qu'Ingénieur militaire de l'Air il est affecté au Service Technique Aéronautique et chargé de la conception aérodynamique des avions subsoniques. C'est ainsi qu'il est amené à s'impliquer dans les pré-études d'un avion de transport de grande capacité et le choix de la solution biracteur, qui s'avérera fondamental dans la réussite d'Airbus, et prend de 1967 en 1974 la responsabilité de la marque Airbus ; c'est dans cette fonction qu'il participe à la négociation de l'Accord Intergouvernemental Airbus, sujet de cette conférence.

**1974-1986 : 2ème challenge : la gestion financière et administrative de la coopération.** Dans une coopération, les différences de cultures, compétences et usages, entraînent des contraintes et surcoûts inacceptables dans un marché civil concurrentiel et qu'il faut éviter par la mise en place d'une organisation contractuelle adaptée. C'est à ce challenge que s'attellera Georges Ville, nommé Directeur Financier d'Airbus Industrie en 1974, fonction qu'il occupera jusqu'en 1986.

**1986-1998 : 3ème challenge : la compétitivité de l'acteur opérationnel Aérospatiale.** En 1986 Georges Ville quitte Airbus Industrie pour Aérospatiale Avions, partenaire français dans Airbus, où il découvre le secteur opérationnel de l'activité. Comme Directeur Adjoint de la division Avions, il s'emploie à instaurer une prise en compte de la dimension économique par les acteurs opérationnels grâce à la mise en œuvre d'un contrôle de gestion décentralisé, d'une transparence de l'information financière et d'une communication appropriée.

En quittant la vie active en 1999, à l'issue d'une carrière riche et passionnante,

Georges Ville s'est ainsi forgé une expertise globale dans les domaines technique, financier, administratif et stratégique.

**Depuis 1999 : le temps de la réflexion et de la transmission.** Dans le cadre de l'Académie de l'Air et de l'Espace (AAE), il continue à se passionner pour les activités de transport aérien et leur réponse au défi des années à venir à l'horizon 2050 : il développe ainsi de nouvelles approches prévisionnelles (modélisation du trafic et conception des nouveaux produits) et crée la commission de l'Aviation Civile.

Il s'intéresse aussi à la transmission de son expérience. Dans le cadre du Comaéro (Comité pour l'Histoire de l'Aéronautique et de l'Espace, créé au sein de la DGA, pour écrire l'histoire de la résurrection à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle de l'industrie aérospatiale française, anéantie au sortir de la guerre en 1945), Georges Ville écrit une histoire d'Airbus empreinte de sa propre expérience. À la demande de la 3AF, il adapte sa rédaction pour une publication en 8 épisodes dans la Lettre de la 3AF en 2006. La transmission aux jeunes générations s'est aussi faite à travers un enseignement professé, notamment à Sup'Aéro, sur les « défis de la construction aéronautique civile à l'horizon 2050 ».

La présente conférence pour 3AF-IdF s'est focalisée sur une période clef de l'histoire d'Airbus : la négociation de l'Accord Airbus intergouvernemental présentée ici sous forme d'un mélodrame en 3 actes précédé d'un prologue et suivi d'un épilogue.

**Prologue : situation et anticipations.** La conférence débute par un rappel des spécificités de l'« Aéronautique Civile ». En premier lieu, le contexte de mondialisation dans lequel se développent le transport aérien et la construction aéronautique civile avec une emprise des Etats-Unis et du dollar. En raison de son efficacité, sa rapidité et son confort, la mise en service dans les années 50 de l'avion de transport subsonique à réaction représente une rupture dans le développement

## Cinquantenaire de l'accord AIRBUS



*Fig. 1 - 5 février 1972 - 1er déplacement tracté de l'Airbus A300 B encore en cours de montage - Usine de l'Aérospatiale de Saint-Martin-du-Touch, grand hall de montage.*

*Crédits : fonds André Cros, archives municipales de la ville de Toulouse, licence CC BY-SA 4.0.*

du transport aérien. L'efficacité de l'avion de transport se mesure par la consommation kilométrique par siège dont la réduction va devenir une préoccupation permanente ; entre 1950 et 2000, celle-ci a été divisée par 5, mais avec un taux de décroissance se réduisant au fil du temps. Après le succès initial des quadrimoteurs puis des trimoteurs, le bimoteur devient la formule la plus efficace pour les nouveaux réacteurs à grand taux de dilution.

En dépit de la forte croissance du trafic, le volume mondial des livraisons est faible avec un volume croissant de 200 à 800 avions par an de 1950 à 2000.

Par ailleurs, les investissements financiers associés au lancement de chaque famille de produits sont très lourds : l'ensemble des dépenses de développement, des coûts de démarrage, des dépenses d'industrialisation et des concessions aux compagnies aériennes de lancement, représentent l'équivalent du chiffre d'affaire de la vente de 150 avions. La marge dégagée par les livraisons d'avion doit permettre leur amortissement ; une analyse macroéconomique de l'activité au niveau mondial montre que la rentabilité ne peut être assurée qu'à partir de 400 livraisons annuelles. Un marché de l'ordre de 800 avions limite à deux le nombre de constructeurs rentables d'où la situation de duopole rencontrée à la fin des années 90. L'objectif ultime d'Airbus sera d'être l'un des deux compétiteurs à côté de Boeing, ce qui prendra une trentaine d'années de 1969 à 1999. L'énorme investissement financier associé au lancement de la gamme de produits nécessaire au maintien de sa présence dans l'activité ne sera rentabilisé

qu'au-delà de l'année 2000.

Qu'en est-il de la coopération ? Sur le plan européen, on la souhaite dans le contexte de la construction de l'Europe et on en a une certaine expérience. La première motivation est la mise en commun des capacités techniques, industrielles et financières et l'élargissement de la position commerciale grâce à un marché domestique plus conséquent. Afin de concrétiser efficacement cette ambition, les leçons devront être tirées des coopérations antérieures et en particulier de celle du Concorde dont l'organisation ne constituait pas une référence à suivre en termes d'efficacité. L'affirmation d'une véritable maîtrise d'œuvre capable d'assurer l'efficacité industrielle, l'interface unique revendiquée par le client et les exigences de partage des financements et des risques ont conduit à rechercher une organisation avec mise en place d'une entreprise commune.

La décennie 60 est marquée par un fort développement économique dans le monde et dans une Europe stimulée par la mise en œuvre de la C.E.E. Cette situation génère une croissance élevée (plus de 15% par an) du trafic aérien et s'accompagne d'une demande pressante d'avions de transport de plus grande capacité. Un mouvement dans cette direction est enclenché aux Etats-Unis à la suite du lancement par Lockheed de l'avion militaire de transport géant C5A Galaxy (équipé de moteurs General Electric) : Boeing, recalé lors de l'appel d'offre civilise sa proposition et lance en avril 1966 le 747, quadrimoteur de grande capacité (équipé de moteurs Pratt & Whitney) ; de leur côté, Douglas et Lockheed poursuivent leurs réflexions en vue du lancement d'avions de grande capacité adaptés au marché intérieur des États-Unis.

En Europe, malgré un savoir-faire reconnu (notamment au Royaume-Uni, pionnier de l'avion à réaction avec le Comet, mis en service en 1952), les activités sont en déclin en raison d'une allocation prioritaire des ressources tant humaines que financières au programme Concorde. Sans développement ni renouvellement des produits existants, il s'ensuit une lente agonie des activités face aux constructeurs américains détenant 90% du marché à la fin des années 60. L'Europe aspire pourtant à se maintenir dans cette activité prometteuse en envisageant une réalisation commune

# Cinquantenaire de l'accord AIRBUS

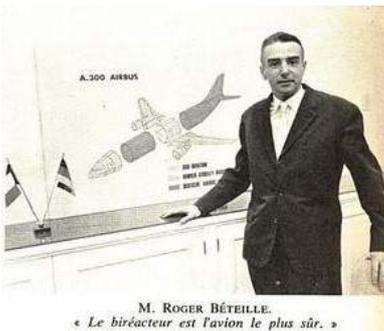


Fig. 2 - Photo parue dans l'Express du 11 mars 1968 illustrant le projet Airbus. - Crédits © L'Express.

**3AF** Les Conférences du Groupe Ile-de-France  
LES BORDS DE L'AÉRONAUTIQUE ET DU SPATIAL  
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, PROJETS, ÉTUDES, ESSAIS  
Association Aéronautique et Astronautique de France

**CINQUANTENAIRE DE L'ACCORD AIRBUS**  
Par **Georges VILLE**, auteur de l'épique Airbus, ancien directeur financier d'Illbruck puis chargé de la direction stratégique chez Hélicoptères, membre et ancien président de l'Académie de l'Air et de l'Espace.

Une conférence organisée par le Groupe Ile-de-France de la 3AF à la Mairie du X<sup>ve</sup> arrondissement, 31 rue Péclet - 75015 Paris (Métro Vaugrand)

**MARDI 17 DÉCEMBRE 2019 de 18h30 à 20h**

Au terme de trente années de fonctionnement, l'organisation issue de l'accord AIRBUS du 29 mai 1967 a permis de réaliser en douceur un avion à la construction aéronautique civile européenne. Georges VILLE, pionnier de l'air, a contribué pendant plus de trois décennies à façonner cette coopération européenne, à présider les divers épisodes et rebroussements de la négociation ainsi que les péripéties de la mise en œuvre.

**INSCRIPTION OBLIGATOIRE** sur le site 3AF  
<https://www.3af.fr/evenement/50ans-airbus>

Entrée gratuite et ouverte à tous, membres et non membres 3AF  
Voir le site 3AF à l'adresse : <https://www.3af.fr/manifestation/conference>

**CALENDRIER DES PROCHAINES CONFÉRENCES 3AF ÎLE-DE-FRANCE (PROJETS)**  
L'attribution des conférences par dates, 3AF, mardi 18 janvier, 18h30-20h.  
Présentation de la situation et de l'actualité des entreprises aéronautiques par Michel PÉRISSON, mardi 26 avril, 18h30-20h.  
L'attribution des conférences et la situation des entreprises aéronautiques par Michel PÉRISSON, mardi 26 avril, 18h30-20h.  
<https://www.3af.fr> - 31 rue Péclet - 75015 Paris - France - 3AF - Société d'Économie Industrielle

adaptée aux besoins européens : toutefois des motivations différentes entre les partenaires gangrèment l'initiative, la France souhaite prolonger la réussite de Caravelle, l'Allemagne espère un retour dans les activités aéronautiques via le marché aéronautique civil et le Royaume-Uni a pour objectif prioritaire le maintien de son motoriste Rolls-Royce dans la cour des grands avec General Electric et Pratt & Whitney. En juillet 1966 une première concertation franco-britannique envisage un avion moyen-courrier de grande capacité dénommé « airbus » (« bus aérien ») et désigne comme partenaires industriels les constructeurs Sud-Aviation et Hawker Siddeley Aviation (HSA).

**Acte 1 : 1967, les fondations.** De nouveaux réacteurs de grande poussée (doublement à 20 T) et plus performants grâce à leur fort taux de dilution (réduction de consommation de 20%) rendent réalisable la construction des avions de grande capacité réclamés par les compagnies. Trois architectures d'avions sont envisageables, bi-, tri- et quadrimoteur ; dans un tel schéma triplement triangulaire (nombre d'avionneurs, de motoristes et d'architectures d'avions), une mainmise américaine sur l'activité apparaissait inéluctable ; heureusement le choix de la solution triréacteur par deux constructeurs (Lockheed et Douglas) libérera pour Airbus la solution biréacteur (la plus efficace et au succès jamais démenti avec sa quasi-exclusivité dans les choix d'Airbus et Boeing pour leurs programmes ultérieurs). En avril 1967, plombé par les financements de ses programmes antérieurs (DC8 et DC9) et en quasi-faillite, Douglas est absorbé à la demande du gouvernement US par McDonnell et intégré dans la nouvelle société McDonnell Douglas. En septembre 1967, Lockheed revient dans l'activité civile en lançant le Lockheed L-1011, triréacteur équipé de moteurs Rolls Royce, choix de motoriste qui mettra ultérieurement en péril la coopération européenne.

En Europe, la réflexion s'oriente vers la solution biréacteur, adaptée au réseau européen (moyen-courrier), la concertation franco-britannique s'élargit début 1967 à l'Allemagne. En juillet 1967, une équipe de coordination industrielle se met en place, avec à sa tête Roger Béteille (Sud-Aviation) pour la France, Jim Thorne (HSA) pour le Royaume-Uni et Felix Kracht (DA) pour

l'Allemagne. Le 28 septembre 1967, les gouvernements français, anglais et allemand signent un protocole d'accord lançant la phase de définition du projet Airbus A300 avec, pour objectif, la présentation de propositions par les industriels (avionneurs et motoristes) afin de permettre aux États une prise de décision de lancement en Mai 1968.

**Acte 2 : 1968, la dévastation.** Dès 1968, une conjonction de faits réduit à néant les bonnes résolutions de coopération européenne.

Aux États-Unis, la domination des constructeurs américains se prolonge avec les lancements en janvier du Lockheed L-1011 TriStar (équipé de moteurs Rolls-Royce) et Du Douglas DC 10 (équipé de moteurs General Electric).

Au Royaume-Uni, l'intérêt pour la coopération faiblit après le choix de Rolls Royce par Lockheed pour les moteurs du L-1011 (assurant ainsi son maintien parmi les trois motoristes phares mondiaux) et la commande de L-1011 par la compagnie British European Airways (BEA) au détriment du projet européen A300 ; de plus l'État manifeste son rejet de la maîtrise d'œuvre confiée à Sud-Aviation pour la cellule en soutenant le projet BAC 311 proposé en concurrence de l'A300.

La France de son côté est confrontée à la multiplication des programmes et à leur financement ; en avril, le gouvernement décide en conseil des ministres la poursuite du programme Concorde (en raison de ses engagements antérieurs), le lancement de Mercure et l'arrêt de l'Airbus, mais sans l'annoncer publiquement. Les manifestations du mois de mai freinent les activités industrielles et officielles et retardent les décisions prévues par l'accord de 1967.

Confronté au rejet des britanniques, au manque d'enthousiasme des compagnies pour l'avion proposé et aux perturbations françaises, l'avenir du programme Airbus apparaît bien compromis à la mi-68 ; heureusement la dissolution de l'Assemblée Nationale en contrecoup des événements de mai 68 va apporter une lueur d'espoir en conduisant à la démission Maurice Papon de son poste de PDG de Sud-Aviation et son remplacement par Henri Ziegler, personnalité expérimentée qui accepte le poste après avoir obtenu un

## Cinquantenaire de l'accord AIRBUS



Fig. 3 - Signature de l'accord franco-allemand le 29 mai 1969 par Jean Chamant, ministre des Transports français et Karl Schiller, ministre fédéral de l'économie allemand dans la maquette de l'Airbus au salon du Bourget.

sursis jusqu'à fin 1968 avant l'annonce de l'arrêt d'Airbus. L'entente fructueuse entre Henri Ziegler et Roger Béteille aboutit à une reconfiguration du projet sous le nom A300B, de plus petite capacité (250 sièges au lieu de 300) et capable d'utiliser les moteurs existants (développés pour le B747, le DC10 ou le L-1011) : en décembre 1968, la présentation du projet reçoit un accueil favorable des administrations et des compagnies.

**Acte 3 : 1969, la résurrection.** Aux Etats-Unis, le B747 fait son premier vol en février et obtient son certificat en décembre ; McDonnell Douglas (MDD) lance en mars la version long courrier DC10-30. En France le Concorde fait son premier vol en mars également, et Dassault lance le Mercure en avril ; la démission du Général De Gaulle en avril et la durée du processus d'élection du nouveau président auront un impact important et favorable sur la

négociation de l'accord.

**Négociation et signature de l'Accord Airbus.** Dès janvier, plusieurs événements soulignent l'évolution favorable de la situation et préparent le lancement de la coopération. Tout d'abord, une concertation franco-allemande stimulée par le ministre fédéral des Finances allemand Franz Josef Strauss s'accorde sur une participation paritaire (50%-50%) ; face au retrait attendu (signifié en mars) du Royaume-Uni, Hawker Siddeley Aviation (HSA) accepte de participer à titre privé à la réalisation de la voilure ; une lettre du président d'Air France confirme l'intérêt de la compagnie pour l'A300B ; enfin, Gérard Neumann, président de General Electric, s'implique pour la motorisation de l'A300B et fait des propositions constructives de coopération pour les motoristes européens.

Et c'est ainsi que, le 29 mai 1969 lors du salon aéronautique, est signé au Bourget l'Accord Intergouvernemental Airbus par Jean Chamant, ministre des Transports français et Karl Schiller, ministre fédéral de l'Économie allemand. Cet accord, le premier des quatre textes fondateurs de la coopération Airbus, fixe les principes à l'origine de la réussite d'Airbus ; citons, la responsabilité de gestion confiée aux industriels, le soutien étatique sous forme d'avances remboursables, la priorité donnée aux compétences pour la répartition des travaux (exonération du « juste retour géographique » pénalisant de nombreuses coopérations), la mise en place d'une



Crédits : fonds André Cros, archives municipales de la ville de Toulouse, licence CC BY-SA 4.0 .

Fig. 4 - Premier vol d'essai de l'A300B à Blagnac le 28 octobre 1972.

## Cinquantenaire de l'accord AIRBUS

entreprise commune (chargée de la maîtrise d'œuvre et de la commercialisation) et pour finir l'absence de clause de sortie pour les participants (dont nous verrons l'importance lors de la « traversée du désert » du milieu des années 70).

Négoциé dans l'intervalle très court séparant la démission du Général de Gaulle (le 23 avril) et l'élection d'un nouveau président en France (Georges Pompidou, élu le 20 juin), l'accord n'accorde que trois semaines à la négociation et ne donne pas d'opportunité aux administrations et parlements nationaux d'altérer le texte proposé. L'équipe de négociation est conduite du côté français par Alain Bruté de Rémur (conseiller technique au cabinet du ministre des Transports) assisté de Georges Ville (Ministère de l'Air) et de Bernard Thoyer (Ministère des Finances), du côté allemand par Hugo Roërig (Ministère de l'Économie) assisté d'un juriste Hasselberg. Georges Ville apporte dans la négociation sa connaissance des écueils rencontrés et pénalisant l'efficacité dans la coopération Concorde.

**Épilogue : la confirmation.** La suite des événements va démontrer le bien-fondé des principes fixés par l'Accord Intergou-

vernemental.

**À court terme,** la coopération est mise en œuvre au niveau industriel selon les principes de l'accord : répartition des travaux en fonction des compétences, choix du moteur GE CF6-50 en décembre 1969.

L'entreprise commune Airbus Industrie est créée en décembre 1970 sur la base d'une structure juridique de Groupement d'Intérêt Économique : celle-ci s'avérera bien adaptée pour répondre aux objectifs et aux contraintes de la coopération (absence de capital, responsabilité conjointe et solidaire de ses membres, transparence fiscale...) et apportera à l'organisation la crédibilité nécessaire auprès des compagnies. La coopération s'élargit en 1970 avec la participation des Pays-Bas (et son constructeur Fokker, refusant d'entrer dans le GIE, en tant que sous-traitant associé) et en 1971 celle de l'Espagne (et son constructeur CASA en tant que membre d'Airbus Industrie). Une convention-cadre est conclue en 1971 entre Airbus Industrie et l'Agence exécutive gouvernementale avec pour objet l'adhésion des industriels aux engagements prévus dans l'Accord Intergouvernemental de 1969 ; en vue de la certification du pro-

Fig. 5 - Henri Ziegler devant le moteur CF6-50 du prototype MSN001.



© Fonds André Cros, archives municipales de la ville de Toulouse, licence CC BY-SA 4.0.

## Cinquantenaire de l'accord AIRBUS

duit, une organisation commune est mise en place regroupant des experts français, allemands et anglais (nommée BOCA, ce sera la première étape conduisant à l'EASA, actuel organisme européen de certification).

**À moyen terme**, l'année 1974 marque une étape importante pour Airbus avec, d'une part, la mise en service du premier avion Airbus par Air France après avoir respecté l'ensemble des objectifs du programme, et d'autre-part, la consolidation de sa structure avec l'installation d'Airbus Industrie à Toulouse et le renforcement de ses équipes avec en particulier la nomination de Georges Ville au poste de Directeur Financier ; dans cette position il négociera des accords industriels permettant de maintenir sa compétitivité au niveau de ses concurrents tel Boeing.

Au milieu des années 70, un contexte mondial de crises (notamment pétrolière) entraîne une forte réduction du trafic aérien, mettant Boeing en quasi-faillite et l'empêchant de développer un produit concurrent à l'A300B d'Airbus. Du côté Européen, les États comme les industriels souhaitent arrêter Airbus. Il n'en sera rien car tant l'accord intergouvernemental que la structure du GIE ne prévoient pas de clause de sortie et aucune partie n'ose prendre le risque de sortir et d'en supporter les conséquences.

**À long terme**, en 1999, Airbus atteint l'objectif inespéré de situation de duopole avec Boeing avec qui il se partage le marché des avions de plus de 100 places, des familles de produits (A300, A320, A330 et A340) couvrant l'ensemble des besoins, et un outil de production bien dimensionné et compétitif.

CR



# Journée Aviation Légère & Environnement

Une journée organisée par 3AF avec le Groupe Ile-de-France, la commission Aviation Légère et Machines Dérivées, la Fédération Française Aéronautique, le Comité Régional Aéronautique d'Ile-de-France et la municipalité de Toussus-le-Noble

Le 2 octobre 2019 au Centre Culturel du Plessis, 78117, Toussus-le-Noble

L'aviation légère participe depuis plus d'un siècle au développement des relations sociales ainsi qu'à l'éveil de nombreuses vocations pour des carrières aéronautiques (avionneurs, équipementiers, compagnies aériennes, armées...) ou spatiales (CNES, Agence Spatiale Européenne...) indispensables au rayonnement et au positionnement économique de la France. Cette contribution présente cependant quelques inconvénients lorsque les vols s'effectuent dans un environnement urbanisé comme le sont certains aérodromes franciliens. Ces inconvénients nécessitaient d'être évoqués au travers de retours d'expériences et d'analyses.



La salle du Centre Culturel du Plessis gracieusement mise à disposition par la municipalité de Toussus-le-Noble.

L'Association Aéronautique et Astronautique de France (3AF) s'est alors associée à la Fédération Française Aéronautique (FFA) et au Comité Régional Aéronautique d'Ile-de-France (CRAIF) pour organiser une journée visant à faire un point sur les défis environnementaux posés par l'aviation légère et les solutions qui existent ou existeraient pour y faire face. La journée, préparée avec la municipalité de Toussus-le-Noble, a bénéficié des soutiens de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), de l'Association Nationale des Pilotes Instructeurs (ANPI), de l'Association Française des Femmes Pilotes (AFFP), du Réseau des Sports de l'Air (RSA), des Fédérations de Vol en Planeur (FFVP) et des Pilotes d'ULM (FFPLUM), de l'Aéroclub de France, de l'Association des Pilotes Propriétaires d'Avions (AOPA), du Syndicat National des Pilotes Professionnels de l'Aviation Légère (SNPPAL), de l'Union des Aéroclubs de Toussus-le-Noble et du Groupe ADP.

Comme en 2017, un Comité de Programme et d'Organisation (CPO) a été constitué pour préparer l'événement cofinancé par 3AF, la Fédération Française d'Aéronautique (FFA), le Comité Régional Aéronautique d'Ile-de-France (CRAIF) et la municipalité de Toussus-le-Noble. La journée s'est tenue le mercredi 2 octobre au Centre Culturel du Plessis (Toussus-le-Noble) avec 98 participants présents.

Basée sur des retours d'expérience, la rencontre a été animée par des experts des domaines, des élus municipaux et nationaux, des représentants d'associations de riverains, d'instances officielles, d'organisme de recherche et de sociétés travaillant pour l'aviation légère. Ont ainsi été successivement rappelés les rôles social et formateur de l'aviation légère, évoqués différents points de vue sur les problématiques associées au bruit, à la gêne sonore. En parallèle de chaque présentation, ont été abordées les perspectives d'évolution et les solutions potentielles d'amélioration. Les échanges, après chaque présentation ou lors de la table ronde, ont permis aux participants d'exprimer leurs points de vue, de partager leurs expériences et, pour certains, d'envisager des collaborations.

Après les introductions de **Pierre-Yves Huerre** (DGAC), de **Jean-Luc Charron** (président de la FFA) puis de **Michel Scheller** (président de 3AF), la journée s'est articulée autour de quatre sessions respectivement désignées "Point de vue sur la problématique", "Le bruit et la gêne sonore", "Les moteurs et essences de l'aviation Légère" et "Les solutions potentielles d'amélioration".



Introduction de Michel Scheller (président de 3AF).

**Alain Gournac** (sénateur honoraire) a rappelé que la France, berceau de l'aéronautique, était reconnue mondialement comme contributeur majeur de l'économie de l'air et de l'espace et que cette excellence reposait sur quatre piliers : la recherche et la conception, la mise en œuvre et le pilotage, la maintenance et le recrutement des talents. Il a indiqué que l'aviation générale, par son histoire et son maillage géographique, constituait une pépinière de vocations qui fournissait, à chaque niveau, les compétences indispensables pour maintenir et développer les savoirs et savoir-faire indispensables au rayonnement de l'industrie.

**Patrick Charles** (maire de Toussus-le-Noble) a mentionné que 70% de l'activité de l'aérodrome était dédiée à la formation, que cette plateforme bénéficiait d'infrastructures de qualité, constituait un atout économique majeur du territoire de

## JAL 2019 - Journée Aviation Légère & Environnement



Patrick Charles, maire de Toussus-le-Noble, © FFA.

Paris-Saclay et avait toute légitimité pour devenir un pôle d'excellence pour la formation aéronautique au regard des besoins futurs. Ce constat nécessitait alors d'anticiper des solutions techniques et d'usage appropriées pour l'inscrire dans un modèle environnemental respectueux exemplaire transposable à d'autres plateformes.

**Bruno Hamon** (DGAC) a mentionné la classification CALIPSO (Classification des Avions Légers selon leur Indice de Performance SONore) des avions légers qui s'inscrit en complément de la réglementation. Cette classification s'obtient à partir de mesures prises en configurations réelles en référence au niveau sonore d'une conversation. Plus de 1000 avions sont aujourd'hui référencés en quatre classes acoustiques, apportant ainsi une information objective relative à leur niveau sonore. La classification des avions est mise à la disposition du public pour favoriser un dialogue argumenté entre utilisateurs et riverains des aérodromes.

**Denis Gély** (ONERA) a rappelé que le bruit généré par un avion léger était composé de plusieurs sources, cependant moins nombreuses que celles produites par un avion commercial. Il a mentionné que la réduction du bruit global nécessitait d'identifier et de caractériser les sources acoustiques pour en comprendre les mécanismes physiques et par suite trouver des solutions capables d'en réduire les effets. La recherche et l'optimisation des solutions susceptibles d'accompagner les évolutions technologiques s'obtiennent à partir

d'essais au sol et/ou en vol ou par simulations numériques.

**Christiane Ferry** (société Scai-Tech), a indiqué que le bruit émis par un avion provenait du moteur, de l'hélice et de l'aérodynamique respectivement pour 47, 47 et 6%. Le développement des conduits d'échappement accordés double flux effectué depuis plus de 20 ans permet de réduire les nuisances sonores à la source sans diminuer les performances (passage CALIPSO de C à B pour les avions). De nombreux appareils basés sur les aérodromes franciliens en sont déjà équipés, d'autres suivront.



Christiane Ferry, société Scai-Tech, © FFA.

**Jacques de Givry** (représentant des Amis du Grand Parc de Versailles) a rappelé que l'aérodrome de Toussus avait vu s'affronter les associations de riverains et les usagers au sujet des nuisances sonores et que la confrontation allait conduire à la fermeture du terrain lorsque les représentants des riverains ont entrepris en 2016 de dialoguer avec les responsables des aéroclubs. Après deux années d'échanges et de travaux constructifs, un accord a été signé et une expérimentation engagée en 2019 avec le soutien de la Préfecture, des élus et de la DGAC. Le récent accord privilégie les avions silencieux (classification CALIPSO) et limite fortement les évolutions des avions bruyants.



Jacques de Givry, président de l'Association "Les Amis du Grand Parc de Versailles" (AGPV), © FFA.

**Raoul Gaillard** (président du CRAIF) a insisté sur la nécessaire communication entre les représentants des usagers et des riverains des aérodromes. La société évoluant dans ses structures et ses attentes, la recherche de nouveaux espaces à urbaniser (PLU, Plan Local d'Urbanisme) a conduit à l'enclavement des aérodromes historiques lorsque les populations aspiraient déjà à plus de tranquillité. Ce qui était accepté et toléré hier est

aujourd'hui devenu source potentielle de conflit. Un dialogue de "Respect mutuel" doit alors

s'instaurer en amont, entre usagers, élus et riverains, pour trouver des solutions acceptables et réalistes aux problèmes de nuisance sonore. Les solutions consistent à réduire le bruit à la source (CALIPSO, exemple l'expérimentation sur Toussus-le-Noble), doter les aérodromes d'un PEB (Plan d'Exposition au Bruit) et initier des politiques d'intégration en proposant des activités culturelles et d'intérêt économique aux populations riveraines.

**Patrice Blin** (société Étampe Aero-Maintenance) a exprimé le point de vue du mécanicien via ses longues expériences sur les moteurs Lycoming, Continental et Rotax. Des informations ont été données sur les consommations horaires (l/h), les consommations spécifiques (kg/kWh), les possibilités, les avantages et les contraintes du passage à l'UL91 (UL est l'abréviation pour UnLeaded = sans plomb, indice d'octane supérieur à 91), la qualité du refroidissement, les délais d'obtention et les niveaux de prix des pièces de rechange, les innovations récentes et à venir, les fragilités, les fréquences et les coûts d'entretien. Des informations précieuses qui ont conforté les avis de nombreux auditeurs.

**Xavier Hottin** (société BP, absent pour nécessité professionnelle) devait évoquer les essences d'aviation et rappeler que l'AVGAS100LL pour Aviation GASoline 100 d'indice d'Octane Low Lead était le carburant le plus utilisé par l'aviation lé-

gère. D'utilisation cependant marginale comparée aux carburants routiers, ce produit évolue continuellement pour accroître le rendement des moteurs et réduire la pollution. Des travaux pour tendre vers l'utilisation d'énergies moins polluantes sont en cours.

**Yves Delrieux** (ONERA) a rappelé le projet ANIBAL (Atténuation du Niveau de Bruit des Avions Légers). L'objectif de ce projet était de définir, de fabriquer et de caractériser par des essais au sol et en vol, une

hélice prototype qui répond à un cahier des charges permettant une utilisation sur un avion remorqueur de planeurs (fortes contraintes mécaniques). Cette hélice devait présenter toutes les caractéristiques nécessaires pour être certifiable, industrialisable, économique et apporter une réduction sensible de bruit sans dégradation notable des performances. Les essais au sol et en vol ont montré que les objectifs visés étaient atteints ; la technologie est aujourd'hui déjà utilisée sur les avions électriques.

**Lucien Rochet** (vice-président de la Fédération Française de Vol en Planeur (FFVP), ex-fédération Française de Vol à Voile) a ensuite mentionné que l'impact du vol en planeur sur l'environnement était et restait naturellement faible car le vol s'effectue sans moteur thermique ou électrique. La seule dépense d'énergie provient de la prise de hauteur indispensable pour commencer le vol. Cette prise de hauteur s'effectue par remorquage derrière un avion, à l'aide d'un moteur intégré ou par treuillage. La Fédération Française de Vol en Planeur œuvre depuis plus d'une vingtaine d'années pour rendre les avions remorqueurs conventionnels plus silencieux (échappement et hélice), développe l'utilisation de remorqueurs ULM et promeut le lancement au treuil à moteur thermique ou électrique.

## « ...la nécessaire communication entre les représentants des usagers et des riverains d'aérodrome... »



*Raoul Gaillard, président du Comité Régional Aéronautique d'Ile-de-France CRAIF, © FFA.*

*Lucien Rochet, vice président de l'Association Française du Vol en Planeur (FFVP), © FFA.*

## JAL 2019 - Journée Aviation Légère & Environnement

Jean-Luc Charron (président de la FFA) a enfin terminé la journée en indiquant que la construction d'un avion électrique, la définition de ses modalités d'exploitation en aéroclubs auxquelles s'ajoutait la nécessaire actualisation de la réglementation constituaient un véritable défi industriel. Dans son "Fab Lab" installé à Toussus-Le-Noble, la FFA, en coopération avec la DGAC et l'EASA, prépare et sécurise l'introduction de l'avion électrique dans les aéroclubs pour la

rence, d'une écoute attentive et la participation soutenue a montré la réelle importance de la problématique des nuisances sonores. Les usagers (fédérations & associations) avec les riverains et leurs administrations (DGAC, mairie de Toussus...) sont aujourd'hui clairement engagés dans un processus de respect mutuel qui intègre l'histoire, l'évolution de l'urbanisation, les aspirations des populations et préserve l'intérêt de l'aviation générale pour le développement des savoirs et des savoir-faire indispensables au rayonnement de l'industrie. Des solutions existent et ne demandent qu'à se propager dans les écoles de pilotage. Les progrès enregistrés sur les échappements et les hélices associés à la classification CALIPSO et à l'introduction de l'avion électrique pour la formation et l'entraînement constituent des avancées significatives et prometteuses d'apaisement.

PG



Jean-Luc Charron, président de la Fédération Française d'Aéronautique (FFA), © FFA.

formation et l'entraînement au vol local. Ces missions sont le cœur de cible de l'emploi de l'avion électrique à un horizon raisonnable de prévision. Dans un environnement très contraint par la pression des riverains, particulièrement à Toussus-Le-Noble avec l'instauration de la plage de silence, l'avion électrique s'avère déjà être une initiative prometteuse d'un futur aéronautique plus silencieux.

Cette journée a été un succès apprécié de tous. L'enchaînement des présentations a fait preuve d'une grande cohé-



De gauche à droite : Pierre-Yves Huerre (DGAC/MAGLH), Patrick Charles (Toussus), Bruno Hamon (DGAC) Jacques de Givry (AGPV), Éric Schaeffner (CFA AFMAé), Xavier Barral (FFA), Jean-Luc Charron (FFA) et Vanessa Pétroutchouk (Aérodrome Innovant Paris-Versailles-Saclay).



Table ronde de la fin de journée, © FFA.



# Les Conférences du Groupe Ile-de-France

LES MARDIS DE L'AÉRONAUTIQUE ET DU SPATIAL  
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, PROJETS, ETUDES, ESSAIS...

[www.3af.fr](http://www.3af.fr)

Association Aéronautique et Astronautique de France

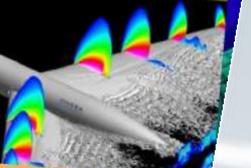
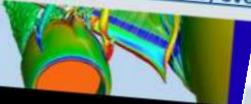
## AÉRODYNAMIQUE DES CONFIGURATIONS PARTICULIÈRES\*

Par Gilles Joubert, consultant en Aérostatique et Aérodynamique, membre de l'Académie des Sciences de l'Air et de l'Espace

Une conférence organisée par la 3AF à la Mairie du XV<sup>e</sup> le **MARDI 14 JANVIER 2020** à 19h30, 31 rue Pécelet - 75015 Paris

Les configurations aérodynamiques (domaines de vol ou de fonction, réactions...) et sont le plus souvent à simuler. Leurs études constituent un défi pour le concepteur et les modèles aérodynamiques destinés à mieux comprendre les phénomènes.

**INSCRIPTION OBLIGATOIRE**  
<https://www.3af.fr/evener>



Entrée gratuite  
Voir le site 3AF à l'adresse

**CALENDRIER DES PROCHAINS EVENEMENTS**  
Contribution du facteur humain aux accidents d'aéronefs et d'hydrofoils et hydroptères, par Patrick Farfal

3AF - ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE



# Les Conférences du Groupe Ile-de-France

LES MARDIS DE L'AÉRONAUTIQUE ET DU SPATIAL  
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, PROJETS, ETUDES, ESSAIS...

[www.3af.fr](http://www.3af.fr)

Association Aéronautique et Astronautique de France

## CONTRIBUTION DU FACTEUR HUMAIN AUX ACCIDENTS D'AERONEFS ET ASTRONEFS DUS AUX AMBIANCES ELECTROMAGNETIQUES

Par Patrick Farfal, 3AF, consultant en ingénierie système. Ancien ingénieur chez Airbus puis EADS Astrium, formateur en systèmes et ingénierie système et Défense.

Une conférence organisée par la 3AF à la salle d'audience de la Mairie du XV<sup>e</sup> le **MARDI 28 AVRIL 2020** de 19h30 à 21h, 154 rue Lecourbe - 75015 Paris

Divers incidents & accidents dus à des interférences électromagnétiques ont été relatés de façon circonstanciée: aéronefs Apollo 12 (1969), échec de la mission américaine Forrester (1967). L'impact de la contribution du facteur humain dans les décisions y ayant conduit, n'est pas toujours exploité; le risque demeure cependant. Des éléments de connaissance de cause.

**INSCRIPTION OBLIGATOIRE**  
<https://www.3af.fr/evener>



Entrée gratuite  
Voir le site 3AF à l'adresse

**CALENDRIER DES PROCHAINS EVENEMENTS**  
Hydrofoils et hydroptères, 12 Mars 2020, Lancement spatial aéroporté: 12 Mars 2020

3AF - ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE



# Les Conférences du Groupe Ile-de-France

LES MARDIS DE L'AÉRONAUTIQUE ET DU SPATIAL  
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, PROJETS, ETUDES, ESSAIS...

[www.3af.fr](http://www.3af.fr)

Association Aéronautique et Astronautique de France

## LES HYDROPTÈRES : CES BATEAUX QUI VOLENT

Par Philippe Perrier, ex-directeur technique du programme Rafale au sein de Dassault Aviation, concepteur de l'Hydroptère et membre de la commission technique "Aérodynamique" de la 3AF.

Une conférence organisée par le Groupe Ile-de-France de la 3AF à la Mairie du XV<sup>e</sup> le **MARDI 12 MAI 2020** de 18h30 à 20h, 31 rue Pécelet - 75015 Paris (Métro Vaugirard)

Il y a plus d'un siècle, des ingénieurs aéronautiques ont fait "voler" des bateaux avec des ailes marines pour échapper au frottement de l'eau sur la coque. Des constructeurs aéronautiques ont réalisé des hydroptères commerciaux pour le transport de passagers (Boeing 929) et aucun voilier de course ne peut aujourd'hui se passer de foils. Philippe Perrier proposera un panorama des différents concepts d'hydroptères passés et présents, à moteur et à voile, en montrant les aspects techniques très spécifiques.

**INSCRIPTION OBLIGATOIRE** sur le site 3AF  
<https://www.3af.fr/evener/aero-hydrofoils-hydropteres>

En partenariat avec la commission Technique "Aérodynamique" de la 3AF



L'Hydroptère à 50kt.

Boeing 929: Hydroptère, 400 passagers à 45kt.

Entrée gratuite et ouverte à tous, membres et non membres 3AF  
Voir le site 3AF à l'adresse : <https://www.3af.fr/manifestation/conference>

**CALENDRIER DES PROCHAINS EVENEMENTS**  
Largage dans le ciel du CSG - Les essais en vol du projet ALTAIR de système de lancement aéroporté par Nicolas Bérard et Jean Hémetz, ONERA & 3AF, mardi 23 juin 2020, 18h30/20h.  
Intelligence Artificielle, par Claude Roche, 3AF, mardi 29 septembre 2020, 18h30/20h.

3AF - ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE, 8 RUE GALILÉE, 75116 PARIS - GROUPE 3AF ILE-DE-FRANCE  
<https://www.3af.fr/> - <https://www.3af.fr/groupe-regional/idf>

Les Conférences du Groupe 3AF Ile-de-France à la mairie du 15<sup>ème</sup>



**Venez enrichir et partager vos compétences**

**Au sein de nos Commissions Techniques, des Groupes Régionaux et du Comité Jeunes  
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**