

## CONFÉRENCES DU SECOND SEMESTRE 2018

**La voltige aérienne****Par Pascale Alajouanine, le 18 septembre à 18h30 à la mairie du XVème de Paris**

La voltige aérienne, un sport rigoureux de précision, un véritable patinage artistique dans l'air... En plus de procurer des sensations fortes et une grande liberté dans les 3 dimensions, la voltige aérienne permet d'affiner son pilotage et sa sécurité.

**Méga constellations de satellites****Par Philippe Galland, le 9 octobre 2018 à 18h30 à la mairie du XVème de Paris**

Depuis peu et à l'image de SpaceX, les opérateurs de satellites pour Internet lancent l'idée de méga-constellations de satellites pour baisser les coûts et améliorer la qualité des services. Un point sera proposé.

**Impact de l'environnement spatial de la terre sur les satellites****Par Sébastien Bourdarie, le 20 novembre 2018 à 18h30 à la mairie du XVème de Paris**

En panne ou lorsque leur vie opérationnelle est achevée, la plupart des satellites restent sur leur orbite. Ajoutés aux fragmentations partielles dues aux collisions ou aux explosions résiduelles, les résidus constituent un risque. Il convient alors de connaître les zones d'évolution de ces débris et leur évolution au cours du temps.



By NSSDC, NASA

# INFORMATIONS GÉNÉRALES

## Forum des Adhérents

La Gazette IdF est l'un des éléments fédérateurs du groupe Ile-de-France de la 3AF.

Pour que ce bulletin joue pleinement ce rôle, un échange convivial avec les adhérents est essentiel.

Le Forum des adhérents a pour but de recueillir vos questions, vos informations et vos suggestions, par courriel : [3af.idf@gmail.com](mailto:3af.idf@gmail.com)

## Appel aux adhérents

Le groupe 3AF Ile-de-France a **besoin de bénévoles** pour faire connaître l'Association auprès des jeunes, élargir l'offre existante de services (conférences, bulletins d'information, visites techniques) et l'étendre à d'autres secteurs de la région parisienne.

Si vous avez des idées et disposez d'un peu de temps, si vous souhaitez proposer des articles, alors n'hésitez pas, faites-en part au bureau du Groupe Ile de France en contactant Paul Kuentzmann, son président à l'adresse : [ktz@onera.fr](mailto:ktz@onera.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)

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

## Contact Groupe Ile-de-France

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

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

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

## SOMMAIRE

**03 Éditorial** : Le retour des lanceurs spatiaux super lourds.

**04 Résumés de conférences** :

- **Vers un renouveau du transport supersonique** - .... 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 ...
- **Présent et futur des drones civils** - ... Il existe une grande variété de drones, leur masse s'échelonnant du gramme (*RoboBee*) à une dizaine de tonnes (drone militaire RQ4 Global Hawk). Un million de drones civils volent déjà dans le monde et entre 150 000 et 200 000 drones de loisir, d'une masse inférieure à 2 kilogrammes, ont été vendus en France...

**12 Universités, laboratoires** : L'envol d'ICARE.

**16 Dossier** : **Go up young man !** Le développement « non linéaire » de SpaceX est devenu le fait le plus visible du secteur spatial dans son ensemble, ce qui en fait un phénomène méritant que l'on s'y attarde afin d'identifier sa cause la plus profonde.

**18 Publications & Courriers des lecteurs**

**19 Rétro-Agenda**

**20 Agenda** : Conférences, visites techniques, appel à tous les ingénieurs.

## Nouveaux membres 3AF - IdF

ABBASSI Mohamed

ABRAM Renaud

ARNTZ Aurélien

BARRAUD Frédéric

BARRAY Alexandre

BELLAIS Renaud

BEQUET Thibaut

BERTHOLIER Caroline

BOCQUIER Antoine

BOCQUILLION Emmanuel

BONSENS Alexis

BROUET Guillaume

BRUNNER Pierre

CABRERA Pierre

CANTEGREIL Julien

CHARDON Adrien

CLERMONT Philippe

COLOMBEL Jean-Yves

CRANCEE Frédéric

DAMOUR François-Iliès

DELMAS Ouidad

EDET Amaury

ESMAEILZADEH Maxime

FLORY Charlotte

GIOVANNI Guillaume

GODARD Mael

GUILLEMAIN Didier

JOSSE Remy

KUHN Emmanuel

LAHEYNE Clyde

LIGREAU Fabien

MARCHETEAU Alain

MENUSIER Didier

MORGAND Stéphane

VANSTEENBERGHE Océane

VINAY Marie

## Adhésions et paiement des cotisations 3AF : N'oubliez pas de régler vos cotisations pour

**2018.** Nous vous rappelons que la cotisation est due au premier janvier de chaque année. Ce règlement est nécessaire pour voter aux assemblées générales. Nous comptons également sur vous pour convaincre nombre d'autres personnes de nous rejoindre. Pour connaître les modalités de paiement de la cotisation ainsi que les barèmes et, éventuellement, mettre à jour vous-même vos coordonnées, vous pouvez accéder à votre compte 3AF en ligne sur le site : <http://www.3af.fr/>. Vous pouvez régler par chèque ou en vous connectant sur le site. Si votre organisme règle votre adhésion et que vous désirez recevoir une facture, il vous conviendra de contacter le Secrétariat Exécutif 3AF. Vous pouvez accéder au site Internet dédié ci-dessus, via le site général : <http://www.3af.asso.fr/>

## LE RETOUR DES LANCEURS SPATIAUX SUPER LOURDS

Les lanceurs spatiaux lourds opérationnels, en développement ou en projet, ont une masse au décollage comprise entre 500 et 900 tonnes : Ariane 5, Ariane 6, Atlas 5, Delta 4 Heavy, Proton M, Long March 5 et 7, Vulcan, etc. Au-delà de 1000 tonnes au décollage, il est convenu de parler de lanceurs super-lourds. Dans cette catégorie rentre par exemple le Falcon Heavy de Space X qui a fait son vol inaugural le 6 février 2018. Dans le passé des lanceurs super-lourds ont déjà été développés, soit pour les missions lunaires (lanceurs Saturn 5 et N1), soit pour le lancement de navettes spatiales (lanceurs STS pour le Space Shuttle et Energia pour le Buran). La période actuelle voit émerger plusieurs projets de lanceurs super-lourds destinés à des missions dans l'espace lointain. Ils sont l'œuvre exclusive des Etats-Unis, de la Russie et de la Chine et ils présentent des caractéristiques originales.

Certains projets sont très ambitieux en visant des masses au décollage supérieures à celle de Saturn 5, notamment le BFR (traduction polie : Sacrée Grosse Fusée) de Space X, en vue d'envoyer vers la Lune ou vers Mars un vaisseau spatial d'une cinquantaine de tonnes.

Les nouveaux lanceurs super-lourds réutilisent des versions de moteurs existants, d'autres font appel à de nouveaux moteurs. Le SLS (Space Launch System) de la NASA réutilise des versions du SRB et du SSME développées pour le Space Shuttle. Le STK russe utilisera une structure de type « fagot » formée d'éléments Soyouz 5 motorisés par le moteur le plus puissant au monde, le RD 171M (8000 kN dans le vide). La configuration fagot permet la récupération-réutilisation des étages inférieurs de lanceurs, comme démontrée par le Falcon 9 de

SpaceX. Les nouveaux moteurs en développement sont le Raptor de SpaceX pour le BFR et le BE 4 de Blue Origin pour le New Glenn, ainsi que les YF 650 et YF 220 chi-

nois pour Long March 9. Les Raptor et BE 4 utiliseront le couple d'ergols liquides oxygène-méthane qui pourrait être fabriqué sur Mars.

Une nouvelle course à l'espace lointain s'annonce. **L'Europe en fera-t-elle partie ?**



*Paul Kuentzmann,  
Président du Groupe 3AF Ile-de-France.*

Par Gérard Théron (Académie de l'Air et de l'Espace et ex-responsable du centre de compétence Propulsion d'Airbus)

Mardi 13 mars 2018 de 18h30 à 20h00

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

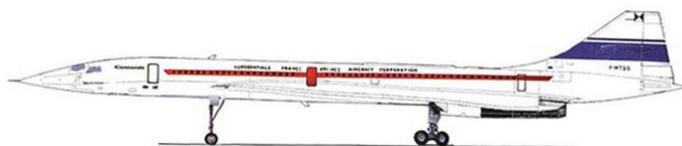


Fig. 1 - Avion Concorde by British Airways.

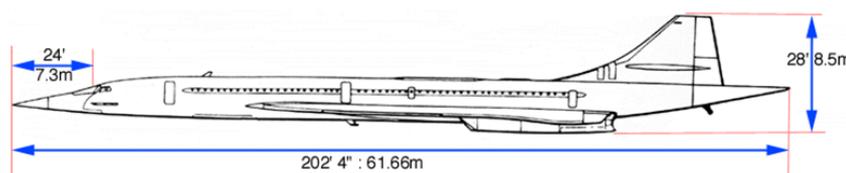
Partant du principe vérifié qu'un constructeur aéronautique part rarement d'une feuille blanche pour concevoir un nouvel avion mais utilise en général l'expérience acquise, Gérard Théron est revenu dans une première partie sur l'histoire du Concorde franco-britannique, le seul avion de transport supersonique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

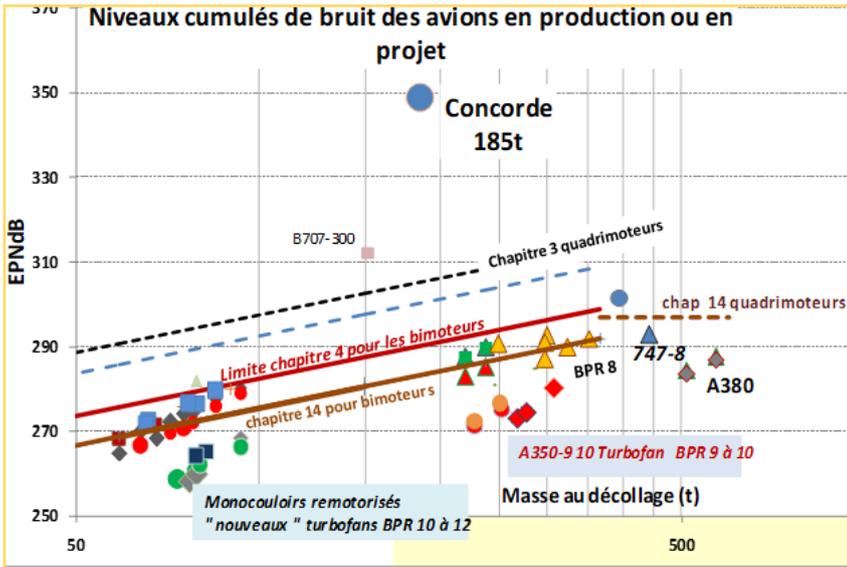


Fig. 3 - Niveaux de bruit en fonction de la masse.

**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 en 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 EPN dB (116.6 en moyenne), c'est-à-dire supérieur de 90 EPN dB 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 :

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

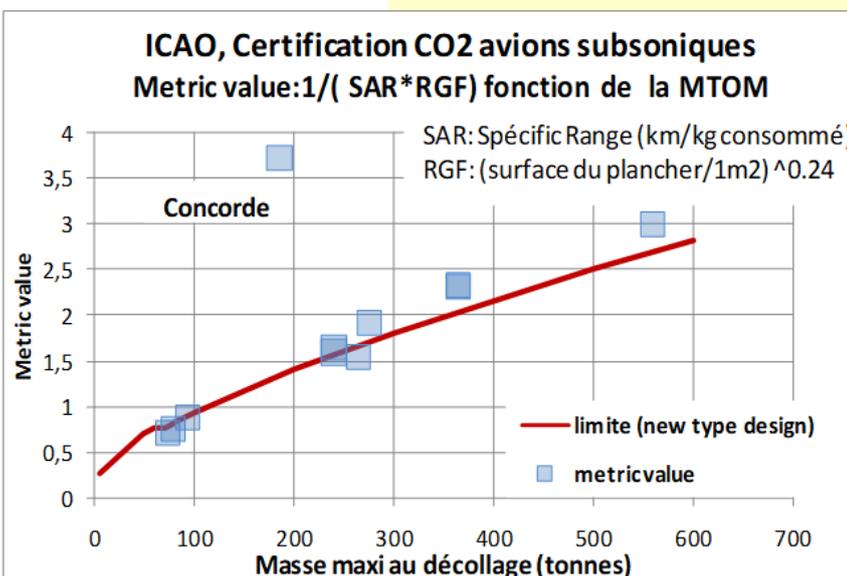


Fig. 4 - Une nouvelle métrique internationale pour la consommation de carburant.

# Vers un renouveau du transport supersonique ?

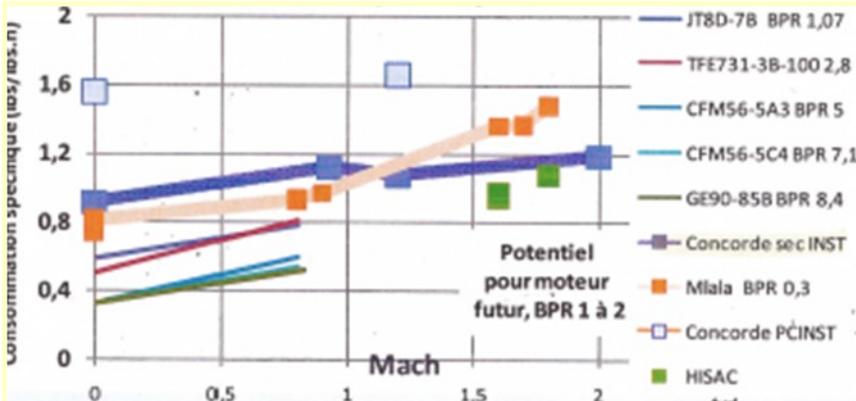


Fig. 5 - Exemples de consommation spécifique de moteurs.

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>.

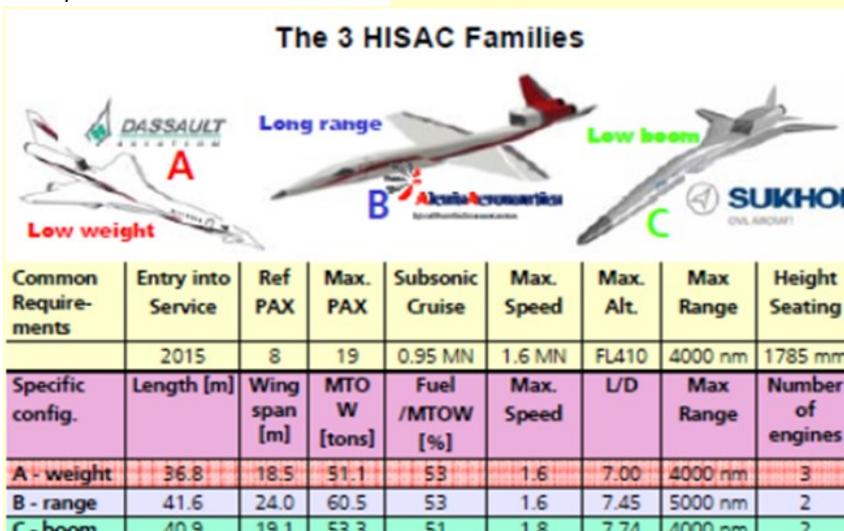
Le programme de recherche européen intégré HISAC (High Speed AirCRAFT), qui s'est déroulé de 2004 à 2008, s'est intéressé à trois concepts spécialisés (figure 6) : le premier « low weight » (leader Dassault Aviation), le second « long range » (leader Alenia) et le troisième « low boom » (leader Sukhoi). 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, masse au décollage 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-

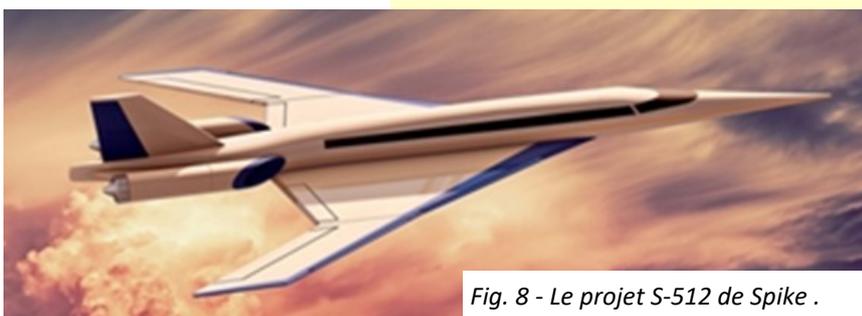


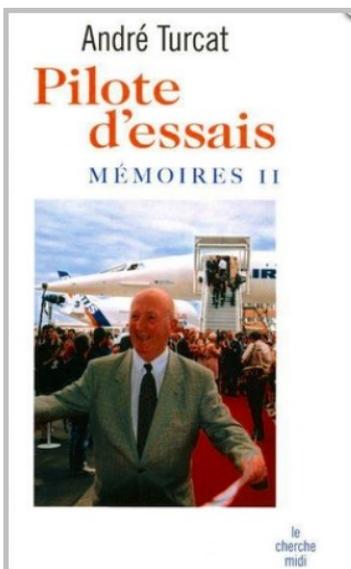
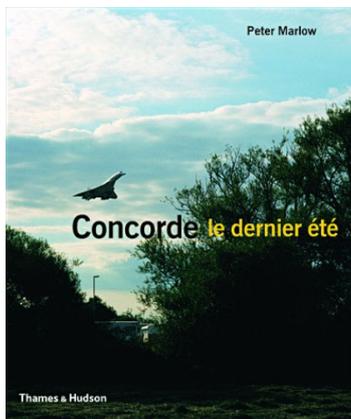
Fig. 8 - Le projet S-512 de Spike .



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 ;

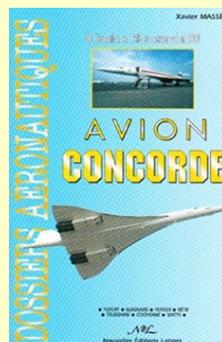
- aérodynamique : les caractéristiques géométriques ne permettent pas d'espérer un gain important de finesse par rapport à Concorde ;
- rayon d'action résultant : au mieux, il sera difficilement supérieur à celui de Concorde, voire inférieur si des marges doivent être prises en compte pour compenser les aléas de développement ; il s'est avéré que la masse de l'avion de série est généralement supérieur à celui 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 excès-

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



**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.



Fig. 1 - Types de drones civils.

1. UAV : Unmanned Aerial Vehicle

### RÉFÉRENCES

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

**T**hierry Prunier, ingénieur retraité de Dassault-Aviation et membre de l'Académie de l'Air et de l'Espace, a livré devant un large auditoire une conférence très vivante et agrémentée de nombreuses vidéos (non reproduites ici) sur les drones civils, aussi appelés UAV<sup>1</sup>. Ce sujet fait de plus en plus fréquemment la une de l'actualité. Un drone est un aérodyne sans équipage télépilote depuis le sol ou programmé.

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

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

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

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

Répartition des drones professionnels en France en fonction de leur masse

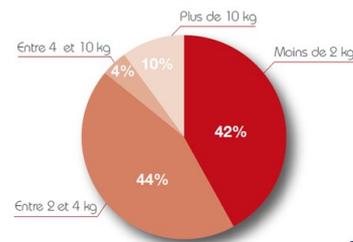


Fig. 2 - Répartition en fonction de la masse.

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

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

Activités des drones professionnels en France

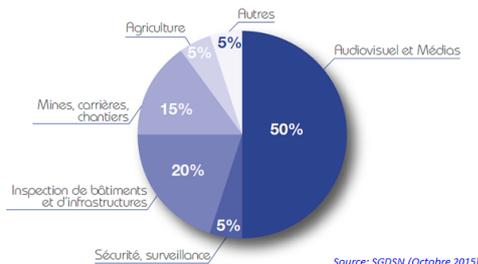


Fig. 3 - Utilisation des drones professionnels en France.

Les données américaines, basées sur les 500 premiers permis commerciaux

# Présent et futur des drones civils



Inspection du Viaduc de Millau



Vérification modules photovoltaïques par thermographie aérienne (EDF ENR)

Fig. 4 - Inspection d'installations par drones.



Surveillance des vignes

Pommiers  
Expérimentations sur le site INRA Mauguio



Stress hydrique—couverts complexes

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

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

accordés par la FAA<sup>2</sup>, sont assez comparables (« Snapshot of the first Commercial UAS<sup>3</sup> Exemptions », AUVSI<sup>4</sup>).

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

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

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

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

Selon la Fédération Professionnelle du Drone Civil, créée en juin 2013, la croissance des activités utiles a été exponentielle en France. Environ 1800 sociétés ont été déclarées opératrices en 2015 (un record mondial), elles opèrent quelques 3000 drones et utilisent 2000 télépilotes. Une réglementation a été mise en place en France (arrêté du 11 avril 2012 mis à jour le 17 décembre 2015), comme dans d'autres pays (63 des 191 pays membres de l'OACI<sup>5</sup> ont aujourd'hui adopté des réglementations, qui ne sont cependant pas totalement cohérentes). Il s'agit d'un problème critique en raison des quasi-collisions enregistrées au voisinage des grands aéroports ; selon l'université de Bard, 36 quasi-collisions ont eu lieu aux Etats-Unis entre décembre 2015 et septembre 2016 ; pour l'aéroport Roissy-CDG, 7 survols illicites ont été relevés en 2015 et une quasi-collision s'est produite

le 19 février 2016 entre un A320 et un drone. La réglementation DGAC<sup>6</sup> (figure 8) repose sur 4 scénarii de vol, en distinguant la masse du drone (2 kg, 4 kg ou 25 kg), le vol à vue ou hors vue directe et la zone survolée (cas particulier des villes). Les réglementations britanniques et allemandes présentent certaines similitudes avec la réglementation française. L'EASA<sup>7</sup> étudie aussi le problème en distinguant les types d'opération : « open » pour les vols les moins risqués avec des drones légers, « specific » pour les vols présentant un certain niveau de risque et « certified » pour les gros drones, chacune de ces catégories se divisant en sous catégories.

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

Et aussi pour la livraison de colis



Fig. 6 - Drones pour la livraison de colis.

Drone utilisé en avril 2011 pour photographier la centrale nucléaire de Fukushima



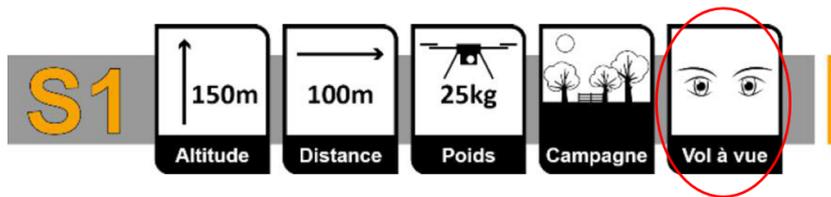
Fig. 7 - L'utilité du drone pour les désastres industriels.

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

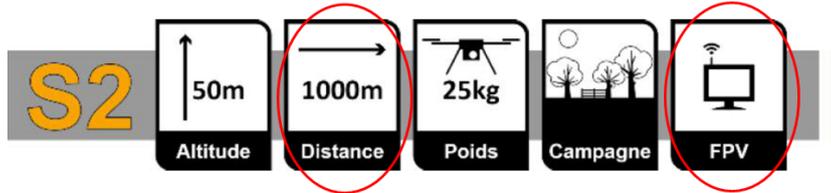
**Ministère de la Transition Écologique et Solidaire** : Drones, loisirs et compétition, voir le site : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/drones-loisir-et-competition>

# Présent et futur des drones civils

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

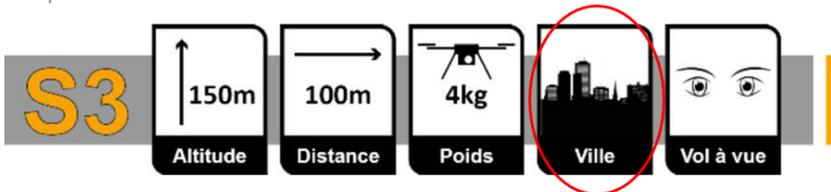


► **Scénario S2** : opération se déroulant hors vue directe, hors zone peuplée, dans un volume de dimension horizontale maximale de rayon d'un kilomètre et de hauteur inférieure à 50 mètres du sol et des obstacles artificiels, sans aucune personne au sol dans cette zone d'évolution.

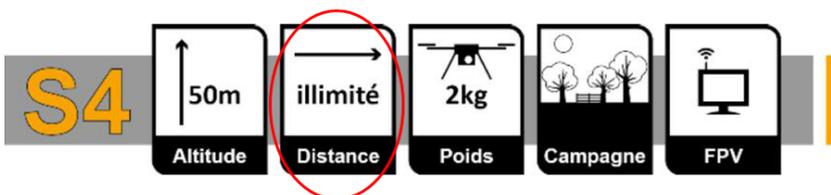


Scénarios de vols en France (1/2)

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



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



Scénarios de vols en France (2/2)

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

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

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

- la priorité doit être donnée au secteur des drones légers à usage professionnel volant à faible hauteur et au-delà de la visibilité du télépilote, ainsi qu'aux moyens de réduction des risques de collision ;
- la réglementation européenne doit être harmonisée ;
- la R&D européenne mériterait d'être augmentée ; le chiffre de 100 Meuros sur cinq ans a été mentionné (cadres H2020<sup>8</sup> et SESAR<sup>9</sup>) ;
- la formation des télépilotes doit être formalisée ;
- des techniques de neutralisation des drones présentant un danger sont à développer ; trois études menées par

des consortia ont déjà été menées en France sous l'égide du SGDSN<sup>10</sup>.

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

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

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

PK

## OUVRAGES :

**Les drones : Fonctionnement - Télépilote - Applications - Réglementation**, par Rodolphe Jobard, édition Eyrolles, collection : serial makers, 182 pages, 18 mai 2017 (3e édition), EAN13 : 978.2.21267.434.7.

**Des drones à tout faire ! Ce qu'ils vont changer dans ma vie au quotidien** par Isabelle Bellin et Sylvain Labbé, éditeur Quae, 200 pages, 2016, EAN13 978.2.75922.530.9.

L'Homme est un éternel voyageur, depuis l'antiquité son désir d'expansion et sa soif de connaissances l'ont amené à traverser des terres, des mers ...et l'espace. Mais à quel prix ? Cette course technologique, effrénée, se traduit par des dommages qui vont bien au-delà de notre Terre. Alors, des femmes et des hommes mènent des recherches pour aider l'Homme dans sa conquête du temps et de l'espace, tout en prenant conscience des dangers que cela représente pour sa survie ... Dans ce voyage où les intérêts scientifiques et socio-économiques sont en contradiction avec le bien-être et la survie de l'Homme.... Je vous invite à faire une halte à ICARE, l'**Institut de Combustion, Aérother-**

**modynamique**

**et Réactivité**

**Atmosphé-**

**rique**, situé au

Centre de la

France, à

Orléans plus

exactement.

Cette Unité

Propre

(UPR3021) du CNRS développe des travaux de tout premier plan dans les domaines de l'énergie, de la propulsion pour le transport terrestre et spatial et de la réactivité atmosphérique.

**L'un des axes de Recherche** de ce laboratoire associe des compétences dans le domaine de la physique des plasmas et des écoulements hypersoniques en s'appuyant sur un ensemble d'installations uniques en Europe. La maîtrise des systèmes de propulsion pour les satellites de télécommunication et d'observation représente à l'heure actuelle un enjeu très important pour la France, et pour l'Europe, en terme économique et stratégique. En effet, le contrôle de la trajectoire des satellites de télécommunication à l'aide d'accélérateurs d'ions assure une économie significative en quantité d'ergol embarquée et accroît considérablement l'autonomie des systèmes. Des recherches ambitieuses sur la propulsion à plasma sont engagées notamment en France, depuis de nombreuses années, pour améliorer les performances des moteurs, augmenter leur durée de vie et atteindre des poussées de plusieurs Newtons. Le laboratoire ICARE est un acteur de

premier plan sur le plan expérimental avec le Moyen National d'essai **PIVOINE-2G (figure 1)** qui a été mis en service en janvier 1998. Cette installation permet de simuler les conditions de l'environnement spatial grâce à un système de pompage cryogénique dont la capacité est de 12 000 l/s permettant ainsi de tester les nouveaux propulseurs de forte poussée. Ces nouveaux propulseurs devront être capables d'assurer un large éventail de missions, du maintien à poste en orbite géostationnaire au transfert d'orbite de plateformes en passant par l'accélération constante et la correction de trajectoire de sondes spatiales d'exploration. Dans cette société de

l'Information où l'accès à la communication est devenu primordial, le développement de petits satellites est devenu un enjeu important. Ceux-ci sont utilisés pour l'observation de la Terre ou pour les télé-

**"... les intérêts scientifiques et socio-économiques sont en contradiction avec le bien-être et la survie de l'Homme..."**

communications et équipés de mini propulseurs électriques. L'attrait pour ces petits satellites est très important, car d'un point de vue économique les missions deviennent "plus rentables" en raison de l'accroissement de la durée de vie des satellites. Un point négatif subsiste : c'est le coût, encore important, de la propulsion électrique. Pour répondre à ces nouveaux besoins, l'équipe Propulsion du laboratoire mène des



Fig. 1 - Propulseur à plasma PIVOINE.

# L'envol d'ICARE

recherches pour miniaturiser les moteurs à propulsion électrique afin de les rendre compétitifs pour les très petits satellites.

Mais, ces satellites d'aujourd'hui sont les débris de demain. Ces débris spatiaux constituent aujourd'hui un sujet de préoccupation majeure aussi bien au sein des agences spatiales que chez les opérateurs de satellites. Le risque qu'un satellite soit détruit par une collision augmente chaque année augmentant ainsi le nombre de débris en orbite autour de la Terre. Ces débris constituent un réel danger, car pour certains leur structure ne sera pas totalement détruite lors de leur rentrée dans l'atmosphère de la Terre, par exemple certains réservoirs ou chambres de combustion des moteurs, conçus pour résister à de fortes chaleurs et de fortes pressions. Des modélisations de calcul de trajectoire sont réalisées par divers organismes mais malheureusement la date et par conséquent la localisation précise où la rentrée aura lieu, sont encore difficiles à prévoir. Les raisons de cette difficulté sont, d'une part parce que la densité atmosphérique évolue en fonction de l'activité solaire et d'autre part parce qu'on ne connaît pas la forme exacte de l'objet, ni son mouvement. Actuellement le manque de données expérimentales concernant par exemple les coefficients balistiques de ces objets est un frein pour prédire avec exactitude la trajectoire des débris. Le laboratoire ICARE travaille sur ces problématiques et œuvre pour apporter des réponses.

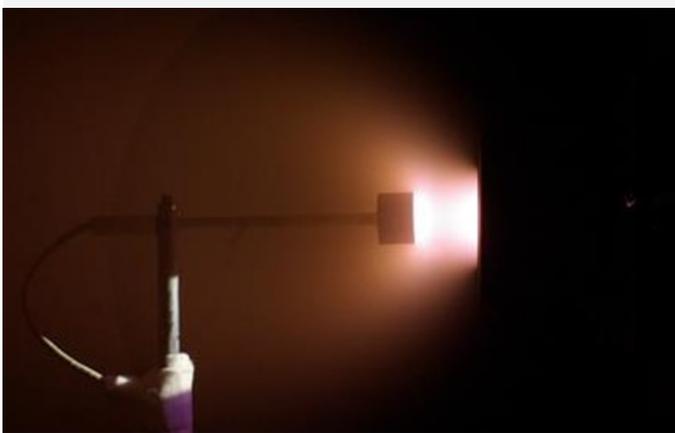


Fig. 2 - Jet de plasma d'air, Phedra.

Au sein du laboratoire, l'équipe Fast<sup>1</sup> mène des activités de recherche expérimentale en aérodynamique des rentrées atmosphériques à l'aide de la plateforme expérimentale FAST : "Facilities for Aerothermodynamic & Supersonic Technology". Cette plateforme réunit 3 moyens d'essai : deux souffleries supersoniques/ hypersoniques froides, **MARHY** (soufflerie à Mach Adaptable Raréfié Hypersonique) et **EDITH** (soufflerie pour l'Étude Des Interactions et Transferts en Hypersonique), et une soufflerie supersonique basse pression

haute enthalpie nommée **PHEDRA** (soufflerie à Plasma Hors Équilibre De Rentrées Atmosphériques), figure 2.

Ces trois souffleries initialement installées à l'ex-laboratoire d'aérothermique situé à Meudon ont été transférées à Orléans en 2000. Cet ensemble permet de simuler expérimentalement les phénomènes aérodynamiques des rentrées atmosphériques depuis la frontière de l'espace (environ 120 km d'altitude) jusqu'à une vingtaine de kilomètres d'altitude. Ces trois souffleries ont un point commun et une particularité importante, elles sont toutes associées à un puissant groupe de pompage propre à chacune d'entre elles. Cela permet un mode de fonctionnement continu, par opposition aux souffleries à rafales où seules des études sur des temps très courts peuvent être menées.

**La soufflerie à Mach Adaptable Raréfié Hypersonique (MARHy)** est une soufflerie raréfiée, couvrant des nombres de Mach allant de 0,6 à 20. Cette soufflerie permet de simuler, en termes de pression, des altitudes comprises entre 20 km et 110 km, ce qui permet de reproduire les régimes d'écoulement transitionnel (*faiblement raréfié*) et proche moléculaire libre (*de plus en plus raréfié*). Ces écoulements parfaitement laminaires sont produits grâce à différentes tuyères de Laval dont les géométries permettent d'obtenir des noyaux isentropiques de l'écoulement compris entre 10 cm et 14 cm, reproduisant expérimentalement plusieurs niveaux de raréfaction (*déterminés par le nombre de Knudsen<sup>2</sup>*). Concernant les régimes hypersoniques, le gaz est chauffé lors de la traversée d'une résistance en graphite avant le col de la tuyère pour éviter qu'il ne se liquéfie lors de la forte détente subie dans le divergent des tuyères hypersoniques. Lors de la réinstallation de la soufflerie MARHy à Orléans, le groupe de pompage a été entièrement renouvelé avec actuellement 2 pompes primaires et 14 pompes de type Roots, lui conférant une capacité totale de pompage de 153 000 m<sup>3</sup>/h. Les conditions extrêmes rencontrées par un véhicule ou une sonde spatiale lors de leur déplacement à des très grandes vitesses dans les couches atmosphériques plus denses sont recréées avec la soufflerie à **Plasmas Hors d'Équilibre De Rentrées Atmosphériques (PHEDRA)**. Cette soufflerie permet de produire des écoulements ionisés supersoniques à basse pression avec un générateur de type arc-jet placé dans le caisson d'expérience dont le principe consiste à détendre un gaz ionisé par transfert d'énergie électrique au travers une tuyère, formant ainsi des écoulements plasmas dont les vitesses sont comprises entre 2 km.s<sup>-1</sup> et 8 km.s<sup>-1</sup>. La

**2. Nombre de Knudsen** : nombre adimensionnel défini comme le rapport du libre parcours moyen à une longueur caractéristique du problème vu sous l'angle de la mécanique des fluides.

## L'envol d'ICARE

géométrie particulière de la tuyère permet d'atteindre des enthalpies spécifiques très élevées,  $50 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , malgré les puissances électriques très modestes mises en jeu ( $< 10 \text{ kW}$ ), évitant ainsi la destruction des électrodes et la pollution du jet de plasma par des particules métalliques.

La soufflerie PHEDRA est capable de simuler expérimentalement des rentrées atmosphériques pour différentes planètes comme la Terre, Mars, Titan ou encore Vénus. Comme pour la soufflerie MARHy, le groupe de pompage associé à la soufflerie à plasma a été renouvelé et automatisé. Il est composé de 3 pompes primaires et de 3 pompes de type Roots de la société MPR, ce qui permet d'obtenir une capacité de pompage de  $26\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Pour la basse altitude, c'est la soufflerie EDITH (*soufflerie pour l'Étude Des Interactions et de Transferts en Hypersonique*) qui est concernée, car le niveau de pression atteint dans la veine d'expériences est de l'ordre du centième de la pression atmosphérique. Elle est équipée d'un compresseur fournissant de l'air propre à des pressions comprises entre 12 Pa et 25 Pa et d'un groupe de pompage comportant 2 puissantes pompes à palettes capables d'absorber 1 kg d'air par seconde en maintenant une pression résiduelle de 4 mbar dans la chambre d'expérience. Ces capacités uniques donnent une grande marge de manœuvre pour adapter la forme des tuyères en fonction des conditions d'études à mener. Cet ensemble expérimental, unique en Europe, permet d'étudier d'un point de vue fondamental et appliqué les phénomènes physiques, chimiques, aérodynamiques et thermiques qui prennent place tout le long d'une rentrée atmosphérique. Quelques études de prospective sont menées comme par exemple le contrôle d'écoulement par plasma en régime raréfié en vue de manipuler les ondes de choc pour freiner les engins spatiaux, ou encore la MHD (Magnéto-Hydro-Dynamique) pour modifier les écoulements ionisés autour des véhicules et diminuer le transfert thermique. Des études plus appliquées comme l'étude des sillages en supersonique raréfié en vue d'améliorer la simulation de la trajectoire des objets sont réalisées avec la soufflerie Marhy. En lien avec la mission Exo Mars, des mesures autour d'une maquette représentant l'orbiteur de rentrée sont actuellement conduites avec la soufflerie Phedra. Dans un futur très proche, les capacités de ces souffleries conjointement à l'expertise et savoir-faire de l'équipe Fast seront mises au service de l'étude du comportement des débris spatiaux, avec une thèse qui débute en septembre 2018.

Le deuxième axe de recherche du laboratoire concerne la combustion qui est un autre mode propulsif utilisé dans des moteurs de fusée, turbines à gaz, moteurs à combustion interne... dont le point commun repose sur la combustion de

combustibles initialement sous forme liquide. Des études théoriques, expérimentales et numériques sont menées en parallèle pour accroître les connaissances dans ce domaine et améliorer le fonctionnement des applications actuelles. Dans ces systèmes, le carburant liquide est dispersé sous forme d'aérosol ce qui permet une combustion plus homogène et augmente le taux de réaction de la combustion du fait d'une surface de contact avec le comburant plus large. Toutefois, la gravité est un élément perturbateur des phénomènes étudiés, en engendrant la sédimentation du carburant. Pour la détermination expérimentale des vitesses de propagation des flammes dans un aérosol (ou brouillard), ces expériences s'effectuent donc principalement sous des **conditions de gravité réduite** avec des conditions d'expériences très particulières, car les chercheurs réalisent ces expériences dans un avion. Avec le concours du **Centre National d'Études Spatiales** des campagnes de 'vols paraboliques' sont organisées pour effectuer des études en microgravité (figure 3).

Ces expériences impliquent beaucoup de contraintes et une organisation très stricte : la préparation d'une campagne expérimentale en vol parabolique passe d'abord par la sélection scientifique du CNES puis le projet doit être ensuite complètement bouclé dans les 6 mois qui précèdent la campagne. Les normes de sécurité doivent être strictement respectées, par exemple les calculs de résistance mécanique des structures doivent prendre en compte des accélérations égales à neuf fois la gravité terrestre, aussi une visite médicale spécifique valide le dossier final de chaque personnel volant. Une campagne de vols se déroule sur 2 semaines. La première est consacrée à l'installation du dispositif expérimental à bord de l'A310 0g et la seconde à la campagne de vols proprement dite. Chaque campagne compte 3 vols répartis sur trois jours. Chaque vol comporte une série de 30 paraboles. Une parabole est en fait une manœuvre que va exécuter l'équipage qui consiste à mettre l'aéronef en chute libre pour créer les conditions de gravité réduite à bord de l'avion. Pour cela, l'avion va d'abord suivre une trajectoire ascendante pleine puissance et avec un angle de  $47^\circ$ , puis arrivé au point d'injection, les pilotes coupent les gaz et placent l'avion en chute libre en accompagnant sa trajectoire, celle-ci décrit alors un arc de parabole, d'où l'expression accrochée à cette pratique. La durée de chute libre est de 22 secondes, ensuite les pilotes redressent la trajectoire pour récupérer le palier initial du vol et permettre ensuite de renouveler l'opération une trentaine de fois. C'est durant ces 22 secondes de pesanteur réduite ou micropesanteur, que les scientifiques à bord de l'avion s'activent pour réaliser leur expérience, et vivre aussi par la même occasion des moments magiques. De retour sur terre, ils

# L'envol d'ICARE



Fig. 3 - Vol parabolique du Centre National d'Études Spatiales.

auront tout le temps de reprendre leurs esprits et de procéder à l'analyse des nombreux résultats obtenus.

Une autre thématique de recherche en lien avec les systèmes propulsifs concerne **l'impact de la nature des carburants sur la qualité de la combustion et ses nuisances**. L'utilisation des biocarburants de deuxième génération (2G) et de mélanges avec des carburants conventionnels devient une nécessité pour assurer la sécurité énergétique et la durabilité en Europe. C'est dans ce cadre que s'est inscrit le projet Européen 2G-CSafe (ERC Advanced Grant 'Combustion of Sustainable Alternative Fuels for Engines used in Aeronautics and Automotives'). Les chercheurs du laboratoire travaillent pour promouvoir les technologies de combustion durable appliquées au transport en passant par la validation de modèles cinétiques de combustion avancés obtenus par l'utilisation combinée de nouvelles expériences sophistiquées de laboratoire, d'expériences avec des moteurs et de calculs théoriques, dépassant les frontières actuelles de la connaissance. On cherche à développer des modèles de cinétique chimique applicables à l'allumage, l'oxydation et la combustion des biocarburants 2G. Ces modèles permettent d'optimiser la combustion, de contrôler l'allumage et de prévoir les émis-

sions polluantes pour des carburants utilisables pour les propulsions terrestre et aéronautique.

Sous différents aspects le laboratoire ICARE participe aux innovations qui font que l'Homme pourra continuer sa quête de connaissances, d'échanges, d'exploration et qui sait un jour il pourra enfin 'Dépasser les frontières' ...

## RÉFÉRENCES

### PIVOINE

**Zurbach, Stephan, Cornu, N., et Lasgorceix, P.** ; Performance evaluation of a 20 kW Hall effect thruster. Proc. IEPC 2011 (Kurhaus, Wiesbaden, Germany), 2011.

### PLATEFORME FAST

**Coumar, Sandra, and Viviana Lago** ; Influence of Mach number and static pressure on plasma flow control of supersonic and rarefied flows around a sharp flat plate, Experiments in Fluids 58.6 (2017): 74.

### PROPULSION CHIMIQUE

**P. Dagaut, P. Diévert** ; Combustion of Synthetic Jet Fuels: Naphtenic Cut and Blend with a Gas-to-Liquid (GtL) Jet Fuel. Proc. Combust. Inst. 36, 433-440 (2017) <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2016.05.045>.

**Thimothée R., Chauveau C., Halter F., Gökalp I.** ; Experimental investigation of the passage of fuel droplets through a spherical two-phase flame. Proceedings of the Combustion Institute, 36 (2), 2549-2557, (2017).

Pascal BULTEL - Président de la Commission Technique  
Exploration et Observation Spatiale (EOS) - 1/2

Le développement « non linéaire » de SpaceX est devenu le fait le plus visible du secteur spatial dans son ensemble, ce qui en fait un phénomène méritant que l'on s'y attarde afin d'identifier sa cause la plus profonde. Retour en arrière : parallèlement au développement des lanceurs consommables, les constructeurs américains, DOUGLAS en tête, se lancèrent très tôt dans l'étude de systèmes réutilisables (les concepts de type FALCON ont été brevetés au milieu des années 1960). Le programme APOLLO puis SHUTTLE infléchirent néanmoins très fortement les capacités industrielles vers la prise en compte des besoins institutionnels.

SpaceX a donc largement bénéficié d'un espace (commercial) laissé en friche depuis plusieurs décennies par ses compétiteurs. En friche, mais fertilisé par l'expérience considérable acquise par l'industrie du pays, un certain essaimage technologique croisé de plusieurs industries (aéronautique, web, informatiques ...). Le marché commercial traditionnel a donc été le premier relais de croissance significatif de l'entreprise, puis, tout a changé. S'il fallut un peu moins de dix ans à SpaceX pour développer les FALCON 1 et 9 (v1.0) il n'en fallut pas plus pour développer la capsule DRAGON, deux itérations du FALCON 9 réutilisables, l'architecture HEAVY et avancer significativement sur le BIG FALCON ROCKET (BFR) !

On notera que ces projets sont principalement orientés vers le vol habité et l'exploration de plus en plus lointaine. Et non seulement lointaine ...

mais de rupture. Elon Musk ne le cache d'ailleurs plus : le prochain arrêt sera Mars. Malgré leurs aspects novateurs et leur réusite incontestable, les autres activités de SpaceX semblent déjà entamer un passage accéléré au second plan. Pourquoi ?

Pour deux raisons principales. D'une part le FALCON 9 réutilisable est un concept ancien (50 ans) qui, s'il constitue une avancée opérationnelle bien réelle, ne constitue qu'un rattrapage de l'histoire. DOUGLAS avait prévu de la faire voler durant les années 1970. D'autre part Mars, qui, si elle fut la cible de plusieurs projets de missions habitées, demeure le véritable challenge de par son inaccessibilité. Enfin et surtout parce que le monde a bien changé. Ce qui était avant tout une devanture politique, l'affirmation de la supériorité d'un système sur un autre, est devenue un besoin. Cette nécessité si elle demeure sous-jacente devrait devenir rapidement (30 ans) devenir lancinante : briser le sentiment d'enfermement.

Ce sentiment est le fruit d'une longue évolution. Le lent mouvement vers l'ouest des civilisations occidentales débuta dès l'âge du fer avec la Grèce. Le développement des agglomérations, les limites de l'agriculture et les conflits incessants finirent par mettre le pays exsangue. Rome, poursuivit ce mouvement en conquérant vers l'ouest des provinces qui approchèrent un premier seuil de saturation à la fin du XVe siècle. On notera que c'est de la péninsule ibérique (là où les ressources étaient les plus faibles) que fut initié la conquête des Amériques. Sa population totale était cependant bien



Concept de DOUGLAS (1965), tous droits réservés.

inférieure à dix millions d'habitants, il n'est donc pas nécessaire d'atteindre une saturation critique pour qu'un mouvement migratoire soit initié.

La forte augmentation de la population mondiale dans un modèle sans cesse plus industriel a réduit l'échéance suivante à seulement cinq siècles. A une différence près : il est désormais impossible de prolonger ce modèle de développement extensif vers l'ouest comme le soutinrent John Soule et Horace Greeley dans les années 1850 en déclarant : « Go West Young Man ! ». De plus le contexte se dégrade continuellement : certaines ressources vitales (minérales, carburants fossiles) seront en voie d'épuisement durant ce siècle et la biosphère souffre (réchauffement climatique, déforestation, pollution). Ces éléments sont conjugués à une évolution soutenue de la population qui augmentera de 50% au XXIe siècle pour s'approcher des 11 milliards. Ces éléments constituent le socle invisible mais fondamental des activités de SpaceX.

**« L'île de Pâques est assez petite, de son sommet on peut l'embrasser dans sa totalité. Celui qui coupa le dernier arbre devait savoir que c'était le dernier, mais il l'abattit quand même »**

John FLENLEY - Université de Massey  
(Nouvelle Zélande)

**« Les civilisations vont vers l'espace ou elles disparaissent »**

Carl Sagan – Scientifique (NASA) & Ecrivain

**« Go west young man »**

John SOULE – Professeur & Editeur / Horace GREELEY  
– Journaliste & Homme politique

Les plans de conquête interplanétaire de l'entreprise succèdent à ceux de DOUGLAS, de la NASA et BOEING qui à leur époque semblaient relever du luxe technologique le plus ostentatoire. Il en va désormais tout autrement, l'environnement est malheureusement devenu « porteur ». À l'heure où la production de certains métaux critiques (notamment le

tient le développement de ses premières startups du domaine spatial. Tout a changé en dix ans .

Si des éléments négatifs et réels poussent à briser l'enfermement planétaire, ces derniers ne peuvent justifier à eux seuls de le faire. Il en faut d'autres positifs pour motiver un effort risqué coûteux, quels sont-ils ?? La capacité



Exploitation minière au Canada.

cuivre) est estimée comme étant en danger dans quelques décennies, comment penser que l'objectif de SpaceX (« Making Life Multiplanetary ») est totalement infondé ?

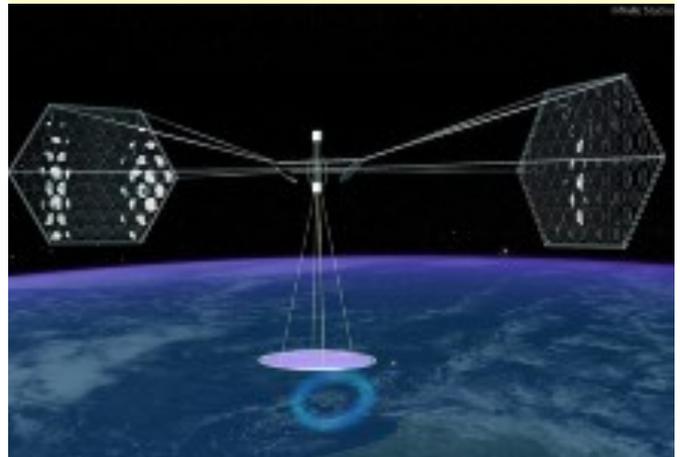
Que ce soit clair, il n'est pas ici question de faire preuve de défaitisme. L'évolution des technologies et des mœurs ainsi que la stagnation de la population sur le long terme auront un effet très favorable. Mais notre siècle marquera un tournant. Aux Etats-Unis SpaceX et BLUE ORIGIN en sont fort conscients. En Europe le Luxembourg met en place un cadre juridique favorable à l'exploitation des ressources minières de tout le système solaire. La Chine sou-

de l'espace à répondre à notre problématique est globale. En ce qui concerne l'énergie on notera trois avantages simultanés : une quantité quasi illimitée d'énergie solaire, non polluante et insensible aux phénomènes atmosphériques. Les ressources minières sont considérables, et si leur éloignement est un handicap celui-ci ne sera pas éternel .

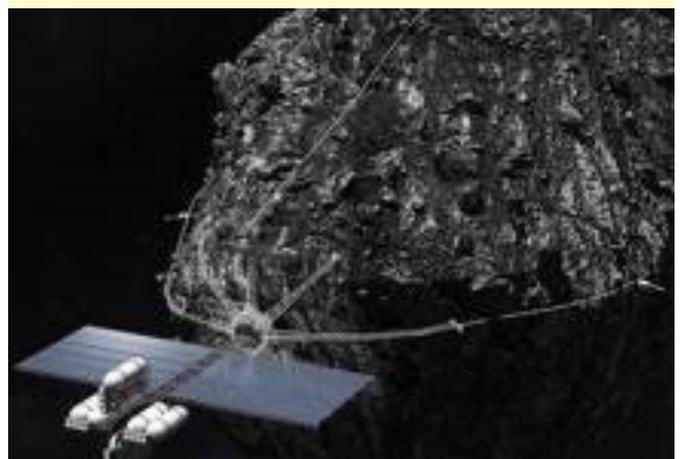
D'autre part il n'y a pas ou peu d'alternatives pour l'approvisionnement en matériaux stratégiques. Enfin, l'espace n'est pas une surface en deux dimensions mais un volume illimité à peupler (tout du moins ses « oasis »). Une tâche qui ne sera pas sans



Le BFS sur Mars, © SpaceX.



Une station solaire orbitale, tous droits réservés.

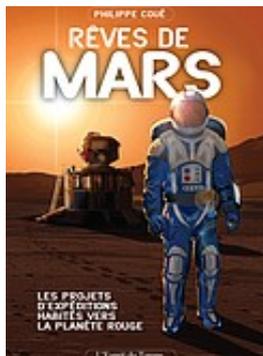


Le minage d'un astéroïde, tous droits réservés.

rencontrer de multiples obstacles, mais dont le besoin s'impose dans un nombre croissant d'esprits.

Go west young man... **GO UP YOUNG MAN, GO UP !!**

# PUBLICATIONS COURRIERS

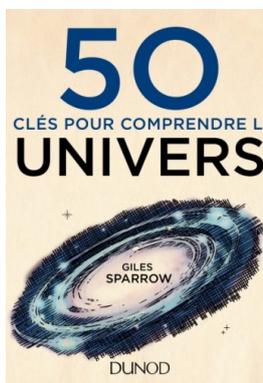


**Rêves de Mars** par Philippe Coué, éditeur EYROLLES, 240 pages, 2018, EAN13 : 9782847954104. Cet ouvrage nous présente les principaux projets d'expéditions habitées vers la planète rouge, en traitant particulièrement des enjeux technologiques et politiques.



**Terre(s)** par Thomas Pesquet, éditeur Michel Lafon, 2017, ISBN 9782749935447. Un recueil des photographies prises par Thomas Pesquet de la station spatiale internationale.

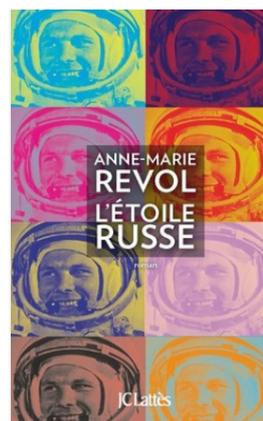
*Les droits d'auteur de cet ouvrage seront reversés aux Restos du Cœur.*



**50 clés pour mieux comprendre l'Univers** par Giles Sparrow, éditeur DUNOD, collection 50 clés pour comprendre, 208 pages, 2018, EAN : 9782100769872.

Cet ouvrage permet de comprendre les secrets de la formation des galaxies et du fonctionnement des trous noirs.

**Un ouvrage aéronautique ou spatial à caractère technique ou scientifique qui vous a plu ? N'hésitez pas à le faire connaître via cette rubrique.**



**L'étoile russe** par Anne-Marie Revol, éditeur JC Lattès, 320 pages, 14 mars 2018, EAN13 : 9.782.70966.090.7. Histoire d'un enfant prodige d'une Russie extravagante qui pour la première fois évolue dans l'espace. Le premier homme qui le 12 avril 1961 évolue dans l'espace dans un monde en pleine guerre froide.



**Mémorables moments d'un instructeur 2. L'aide mémoire** par Serge Boichot, éditeur Cépaduès, 2018, ISBN : 9782364936300, Référence 1630. Des souvenirs d'un instructeur d'aéro-club et une base d'information pour des retours d'expérience. A lire à la suite du Tome 1.



**Piloter un autogire** par Jean-Marc Lezcano, Laure Peytavin, éditeur Cépaduès, collection Pilote ULM, 2018, référence 1619, ISBN : 9782364936195. Cet ouvrage permet d'appréhender l'apprentissage du pilotage d'un autogire de loisir biplace de série, de catégorie ULM en France.

## COURRIER DES LECTEURS

**Quels sont les enjeux autour des lanceurs réutilisables ?**

**Réponse du Gr IdF** - Au-delà du défi technologique, l'enjeu est économique : l'objectif visé avec la réutilisation des étages est d'abaisser significativement le coût du kg lancé en orbite afin d'obtenir un système de lancement compétitif. Cet objectif est crucial dans un contexte où le marché des lancements spatiaux est de plus en plus concurrentiel. Il s'agit d'un défi plus complexe qu'il n'y paraît car la réutilisation ne constitue pas – à elle seule – la garantie d'abaisser les coûts de lancement. La principale raison est que la récupération et la remise en état des étages a un coût, qu'il convient de mettre en balance avec les économies réalisées sur la fabrication. Plus globalement, il s'agit de résoudre une équation économique très complexe qui dépend aussi bien des choix technologiques que du modèle économique (en particulier la cadence de lancement visée) ou de l'organisation industrielle sur laquelle on s'appuie.

La navette spatiale américaine, qui fut le premier système de transport spatial orbital semi-réutilisable, a été un échec du point de vue de cet objectif de réduction des coûts, mais les spectaculaires avancées de SpaceX mais aussi de Blue Origin dans le domaine de la réutilisation (tous deux avec un concept très différent de la navette, empruntant le moins possible aux technologies aéronautiques) ont ouvert récemment de nouvelles perspectives. Cependant, la réutilisation n'en est qu'à ses débuts et il est encore trop tôt pour quantifier précisément son impact sur la réduction des coûts. « Rêvée » depuis les origines même de l'aéronautique, la réutilisation est encore un « nouveau monde » qui reste largement à explorer.

## CONFÉRENCES & COLLOQUES ILE-DE-FRANCE

**1. AMPERE** (Avion à Motorisation réPartie Électrique de Recherche Expérimentale), un concept développé par l'ONERA.

**Mardi 6 Février**  
**GROUPE ILE-DE-FRANCE - Histoire et évolution des remorqueurs orbitaux.** Une conférence proposée par Pascal Bultel, président de la Commission 3AF Exploration Spatiale et Observation. Ce que la science fiction avait imaginé et ce qui a réellement été possible à ce jour. Lieu Mairie du 15ème, Paris.



**nique**, une conférence proposée par Gérard Théron, ancien chef du centre de compétence Propulsion d'Airbus et membre de l'Académie de l'Air et de l'Espace. L'exposé a montré clairement que l'objectif visé rend improbable le développement de projets d'avions supersoniques à grands rayons d'action ayant des performances environnementales acceptables.



Un point effectué avec réalisme en lien avec Jean-Luc Wibaux, agent du tourisme spatial.



**Mardi 12 Juin**  
**GROUPE ILE-DE-FRANCE - Le concept d'avion électrique AMPERE<sup>1</sup>,** une conférence proposée par Jean Hermetz, ONERA, Département Traitement de l'Information et des Systèmes. Un concept d'avion régional à propulsion électrique distribuée, qui doit permettre de transporter de 4 à 6 personnes sur 500 km en 2 heures. Les principales idées ont été exposées.



**Jeudi 8 Mars**  
**Les Femmes et l'industrie aérospatiale à la Mairie du 15ème.** Une journée organisée en partenariat avec 3AF. Des femmes du monde aéronautique et spatial ont invité collégiens et collégiennes, lycéens et lycéennes à venir poser leurs questions aux professionnelles des secteurs aéronautique et spatial via des conférences, des tables rondes et des stands des métiers.



**Mercredi 18 Avril**  
**COMMISSION PROPULSION avec le GROUPE ILE-DE-FRANCE.** Prometheus : le futur de la propulsion liquide fusée, une conférence proposée par Emmanuel Edeline (Ariane Group) et Christophe Bonhomme (CNES).



Retrouvez les supports de présentation sur le site 3AF <https://www.3af.fr/events/archives>

**Mardi 13 Mars**  
**GROUPE ILE-DE-FRANCE - Le renouveau du superso-**

**Mardi 15 Mai**  
**GROUPE ILE-DE-FRANCE - Le tourisme spatial,** une conférence proposée par Christophe Bonnal, expert senior à la direction des lanceurs du CNES. Quel avenir pour le tourisme spatial et à quelles conditions ?

# AGENDA

## CALENDRIER DES CONFÉRENCES 3AF Ile-de-France

- **MARDI 18 SEPTEMBRE de 18h30 à 20h**, « *LA VOLTIGE AÉRIENNE : LA TÊTE À L'ENVERS, LES PIEDS SUR TERRE* » par *Pascale Alajouanine*, double championne d'Europe.
- **MARDI 09 OCTOBRE de 18h30 à 20h**, « *MÉGA-CONSTELLATIONS : NOUVEAU PARADIGME POUR LA PRODUCTION DE SATELLITES* » par *Philippe Galland*, responsable du retour d'expérience OneWeb chez Airbus Defence & Space.
- **MARDI 20 NOVEMBRE de 18h30 à 20h**, « *IMPACT DE L'ENVIRONNEMENT SPATIAL DE LA TERRE SUR LES SATELLITES* » par *Sébastien Bourdarie*, ONERA.

### Venez enrichir et partager vos compétences

Au sein de nos Commissions Techniques et de nos Groupes régionaux

Avec nos colloques et conférences au meilleur niveau mondial

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

### 3AF, Association Aéronautique et Astronautique de France

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