



Association Aéronautique
et Astronautique de France

LETTRE 3AF

La revue de la société savante
de l'Aéronautique et de l'Espace



LOUIS LE PORTZ, NOUVEAU
PRÉSIDENT DE LA 3AF



VIE 3AF : INTERVIEW DE JEAN-YVES
LE GALL, PRÉSIDENT DU CNES



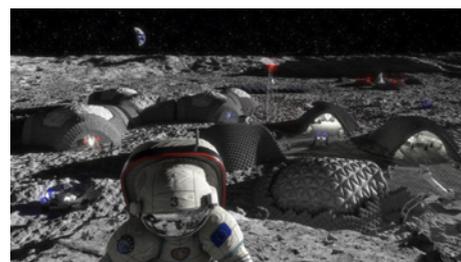
DOSSIER ESPACE



BRUIT DES AVIONS



DÉMONSTRATION DE LARGAGE DE
LANCEUR AÉROPORTÉ AVEC LE
DÉMONSTRATEUR ÉOLE DE L'ONERA



LE VILLAGE LUNAIRE ; QUEL RÔLE
POUR L'EUROPE ?

3 ÉDITORIAL

4 MESSAGE DU PRÉSIDENT

POINTS DE VUE

- 5 **LA CONFÉRENCE SPACE19+**
par Jean-Yves Le Gall, Président du CNES
- 7 **SYNTHÈSE DU SÉMINAIRE DE PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE LE HAVRE 8-10 OCTOBRE**
par Juliette Lambin, CNES
- 9 **ARTICLE DROIT DE L'ESPACE**
par Philippe Clerc, CNES
- 16 **RÉVOLUTION ET RESPONSABILITÉ : LES DÉFIS DE L'ESPACE**
par Jacques Arnould, CNES

ACTUALITÉS

- 19 **POINT SUR FEDERATION**
par Damien Hartmann, President OPEN SPACE MAKERS
- 21 **PRIX DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES**
par Julie Amoyel et Bruno Chanetz, ONERA

ESPACE

- 23 **L'ASCENSEUR SPATIAL**
par Christophe Bonnal, CNES
- 36 **LE LANCEMENT SPATIAL AÉROPORTÉ**
par Nicolas Bérend, Julie Gauvrit-Ledogar, et Jean Hermetz, ONERA
- 43 **ARTEMIS, UNE DÉSÉE EUROPÉENNE**
par Peter Weiss, COMEX

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

- 45 **CR DE LA JOURNÉE TECHNIQUE TITANE DU 15 MAI 2019**
par Anne Denquin, CT Matériaux
- 46 **CR DE LA JOURNÉE AMORTISSEMENT**
par Bernard Troclet, CT Structure
- 49 **CALCUL DE GRADIENTS EN SIMULATION AÉRODYNAMIQUE**
par Jacques Peter et Antoine Dumont, ONERA
- 52 **LE BRUIT DES AVIONS**
par Denis Gely, CT Aérodynamique
- 58 **LE KÉROZÈNE, CE HÉROS INCONNU**
par Mickael Sicard, ONERA

FORMATION & CARRIÈRES

- 63 **INTERVIEW DU COMMANDANT CYRIL HOSPITAL SUR LA FORMATION DES FUTURS PILOTES DE TRANSPORT MILITAIRE DE L'ARMÉE DE L'AIR**
par Jean-Pierre Sanfourche
- 69 **CÉRÉMONIE DU 24/9 À LA BA 709 DE COGNAC POUR CÉLÉBRER LE REMPLACEMENT DU TB30 EPSILON PAR LE PC21 PILATUS**
par Jean-Pierre Sanfourche

VIE 3AF

- 71 **COMPTE-RENDU DE L'AG DU 18 SEPTEMBRE 2019**
par Bruno Chanetz
- 74 **INTERVIEW DE JEAN-YVES LE GALL**
par Bertrand de Montluc et Jean-Pierre Sanfourche
- 76 **LE GR IDF**
par Paul Kuentzmann, Patrick Gilliérion et Gérard Laruelle

CULTURE

- 79 **JULES VERNE DANS LE CINÉMA**
par Jacques Peter

NOTES DE LECTURE

- 84 **LE SILENCE DE LA PANTHÈRE DE JACQUES PETER**
par Bruno Chanetz
- 85 **LES EXO-PLANÈTES DE FLAVIEN KIEFER**
par Marie-Claire Coët
- 86 **ARIANE, UNE ÉPOPÉE EUROPÉENNE DE WILHELM HUON**
par Bruno Chanetz

ÉVÉNEMENTS 3AF

- 87 **LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS**

ÉDITEUR

Association Aéronautique
et Astronautique de France
6, rue Galilée, 75116 Paris
Tél. : 01 56 64 12 30
secrexec@aaaf.asso.fr

DIRECTEUR DE LA
PUBLICATION
Louis Le Portz

RÉDACTEUR EN CHEF
Bruno Chanetz

COMITÉ DE RÉDACTION
Pierre Bescond
Jean Déleroy
Jean-Yves Guédou
Bertrand de Montluc
Jean-Pierre Sanfourche
Jean Tensi
Pierre Tréfouret
Bernard Vivier

CONCEPTION GRAPHIQUE
ICI LA LUNE
www.icilaLune.com

Droit de reproduction, textes et
illustrations réservés pour tous
pays.



ÉDITORIAL

La transition énergétique a permis de construire le monde moderne et de nous faire bénéficier de toutes les commodités de la vie actuelle. Je veux parler bien sûr de la transition énergétique ... qui au XIXe siècle nous a fait basculer dans l'ère industrielle. Nos moulins à vent, dont la production d'énergie intermittente suffisait dans une société proto-industrielle, ont progressivement disparu, le charbon, puis le pétrole, représentant un potentiel énergétique combien plus efficace et plus facilement mobilisable.

Plus que tout autre secteur, celui de l'aéronautique doit son essor et son existence même au pétrole. Si le premier véhicule automobile à avoir franchi le cap des 100 km/h en 1899 est bien le véhicule électrique la *Jamais-Contente*, sans le moteur à explosion l'avion n'aurait pu exister. Pour le 500e anniversaire de la mort de Léonard de Vinci, je me suis replongé dans les prémices de la théorie du vol pour une conférence au Louvre dans le cadre de l'exposition qui lui est actuellement consacrée. Reprenant les travaux de Léonard quatre siècles plus tard, le médecin Etienne-Jules Marey énonçait que la puissance de l'homme devrait être 200 fois plus grande pour qu'il puisse s'élever en actionnant des ailes artificielles. Nous devons reconnaître la faiblesse musculaire de l'homme qui en effort prolongé ne développe qu'une puissance de 500 W. Jean-Marc Jancovici, professeur à l'Ecole des Mines, expert en énergie, faisait dernièrement cette comparaison évocatrice ¹ : *la puissance développée par un simple robot ménager équivaut à celle de quatre cyclistes*. Il déclarait également à son auditoire qu'un *occidental vit comme s'il avait deux cents esclaves à son service*.

Le moteur à explosion, qui fut à l'origine du développement du plus lourd que l'air, doit tout au pétrole. Aussi Mickaël Sicard (ONERA) intitule-t-il son article : *Le kérosène, ce héros méconnu*.

Cependant cette Lettre est en majorité consacrée à l'Espace, le sujet n'étant pas épuisé malgré l'édition spéciale Espace, parue en juin. Ainsi le CNES nous donne une suite de quatre articles points de vue : une synthèse par Jean-Yves Le Gall de la réunion du conseil de l'ESA au niveau ministériel qui s'est tenue à Séville les 27 et 28 novembre derniers, puis une relation du séminaire de Prospective scientifique du CNES et deux articles juridiques et éthiques.

Entre rêve et réalité, Christophe Bonnal (CNES) évoque l'ascenseur spatial. L'échelle de Jacob dans le livre de la *Genèse*, et la littérature enfantine avec *Jacques et le haricot*

magique, ont tracé la voie d'un ascenseur pour atteindre le ciel. Les progrès dans le domaine des matériaux rendent désormais ces projets moins utopiques. Cet article très documenté complète son exposé d'avril 2019 donné dans le cadre des conférences du Groupe régional Ile-de-France à la mairie du XVe arrondissement de Paris.

L'article sur le bruit des avions résulte aussi d'une conférence donnée par Denis Gély (ONERA) en juillet 2019 lors des présentations scientifiques organisées par le Groupe régional Ile-de-France, dont les activités sont évoquées dans cette Lettre.

Dans Vie de la 3AF, on trouvera les grands moments de l'Assemblée générale du 18 octobre, qui a vu l'élection de notre nouveau Président Louis Le Portz. Michel Scheller, qui a tant apporté à notre association, continuera à lui faire profiter de ses précieux conseils en tant que Président d'honneur. Une interview de Jean-Yves Le Gall permet de préciser quelles sont les attentes du CNES vis-à-vis de la 3AF.

L'actualité laisse la place aux prix de l'Académie des sciences attribués cet automne à des chercheurs de l'ONERA et du CNES. Egalement le 8 octobre 2019, deux astronomes suisses, Michel Mayor et Didier Queloz ont été récompensés par le prix Nobel de physique, pour leur découverte de la première planète tournant autour d'une étoile autre que le Soleil. Nous en sommes maintenant à environ 4000 exo-planètes répertoriées, comme le souligne la note de lecture sur l'ouvrage de Flavien Kiefer à découvrir en fin de numéro.

Une autre note de lecture est consacrée au livre de William Huon *Ariane, une aventure européenne*, préfacé par Jean-Yves Le Gall. Ce succès, dont la France a le droit d'être fière, est à mettre au crédit de la recherche. Quand, au nom du sauvetage de la planète, il est de bon ton de dénigrer le progrès et à l'heure où des collapsologues prédisent l'effondrement du monde, une société savante se doit de rappeler que grâce aux progrès de la science, qu'on nomme désormais innovations, l'humanité vit mieux partout à la surface du globe.

Souhaitons que 2020 nous apporte de beaux succès. La Lettre 3AF continuera à se faire l'écho des avancées scientifiques et techniques dans le domaine aérospatial avec toujours autant de foi et d'espérance dans l'avenir. ■

Bruno Chanetz
Président du Haut conseil scientifique
Rédacteur en chef

¹ conférence à Loudun (Vienne) le 22 octobre 2019 : <https://www.youtube.com/watch?v=Ubx9YbMz8gM>

LE MESSAGE DU PRÉSIDENT



Chers amis,

Il m'est agréable de préfacier cette dernière Lettre de l'année 2019 en tant que nouveau Président de la 3AF.

Tout d'abord, je rends hommage à Michel Scheller qui a porté notre association à un haut niveau de notoriété et de reconnaissance. Durant les 15 ans de sa présidence, il a su insuffler aux membres actifs de la 3AF l'énergie qui a permis la réalisation des objectifs ambitieux qu'il avait fixés à notre association. Les congrès internationaux qui ont été organisés par la 3AF ont puissamment contribué à son rayonnement. Les cahiers émis par les Commissions techniques, les articles produits par ses membres et publiés dans la Lettre ont également conforté notre société savante.

Depuis l'Assemblée Générale du 18 septembre 2019, m'a été confiée la mission de préparer l'avenir de la 3AF. C'est une tâche passionnante, qui doit mobiliser tous les membres de notre association et que j'entends partager avec vous tous et en particulier avec les Groupes régionaux et les Commissions techniques.

Elle s'organise autour de trois grands chantiers :

- Recentrer l'offre de services de notre association sur les attentes de ses adhérents, personnes physiques et personnes morales. Il faut pour cela être sur le terrain, à l'écoute des attentes des différentes catégories de nos membres, car elles diffèrent selon le métier, la région et le stade dans le développement de leur carrière.
- Enrichir et valoriser cette offre de service, en tirant parti des ressources du digital : c'est en ce sens qu'il faut mener cette « indispensable transition numérique » évoquée par le président du CNES, Jean-Yves Le Gall, dans son interview, et à laquelle j'adhère tout à fait. Le site internet apporte à chaque parution de la Lettre 3AF une information de premier plan aux internautes friands de connaissances scientifiques de haut niveau. Les archives, accessibles à tous, constituent un réservoir inépuisable de lectures passionnantes. Il faut toutefois le moderniser et développer les services et sa présence sur les réseaux sociaux afin de fournir à nos adhérents ce « cadre dynamique d'échange et de partage » qui est la vocation première de la 3AF ainsi qu'un accompagnement dans leur développement de carrière.
- Améliorer le fonctionnement opérationnel et pérenniser notre association en réduisant son exposition à certains risques : là encore, les ressources du digital doivent nous permettre d'être plus efficaces dans la préparation de nos activités et de gagner en agilité.

Notre calendrier 2020 sera également très riche d'événements.

Trois grands congrès d'envergure internationale marqueront le premier trimestre de l'année 2020 : OPTRO 2020, du 28 au 29 janvier dans le centre de conférence de l'OCDE à Paris, AEC 2020, au centre de congrès de Bordeaux du 24 au 28 février et la Conférence internationale d'Aérodynamique appliquée (AERO2020) à l'ISAE-ENSMA de Poitiers du 23 au 25 mars 2020.

Les Groupes régionaux, en proposant partout en France des conférences et des visites, ont une action vivifiante et capitale pour faire connaître la 3AF. En 2020, en partenariat avec Alumni-ONERA, le Haut conseil scientifique de la 3AF a décidé de lancer une série de journées historico-scientifiques :

- à Loudun le 5 juin 2020 par le GR Poitou-Charentes, journée qui sera ouverte par Bruno Belin, président du conseil départemental de la Vienne et Michel Scheller ;
- à Méaulte le 18 septembre 2020 par le GR Hauts-de-France, journée que j'aurai le plaisir d'ouvrir avec Jean-Luc Demilly, député de la Somme ;
- à Hendaye le 9 octobre 2020 par le GR Pays de l'Adour, journée qui sera ouverte par Yves Saint-Geours, président de la Commission Française pour l'UNESCO et Bruno Chanetz, président du HCS.

Nous aurons l'occasion de revenir en 2020, dans la Lettre, sur tous les événements qui marqueront le calendrier 2020 de notre association.

Et je sais également pouvoir espérer le meilleur pour la 3AF grâce à votre engagement à tous !

Je vous souhaite à toutes et à tous de bonnes et joyeuses fêtes de fin d'année et vous présente tous mes vœux pour cette nouvelle année 2020 pour vous, vos familles et tous ceux qui vous sont chers. ■

Louis Le Portz
Président de la 3AF

LA CONFÉRENCE SPACE19+

par Jean-Yves Le Gall, Président du CNES



Réunion du Conseil de l'ESA à Séville

La réunion au niveau ministériel du Conseil de l'ESA (Conférence Space19+), qui s'est tenue à Séville les 27 et 28 novembre 2019, avait vocation à préparer l'avenir du spatial européen. Elle intervenait dans un contexte marqué par une concurrence importante sur les marchés commerciaux globaux, mais aussi par des opportunités de coopération internationale importantes, notamment dans le domaine de l'exploration humaine et robotique. Co-présidée par Frédérique Vidal, Ministre française de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et Manuel Heitor, Ministre portugais de la Science, de la Technologie et de l'Enseignement supérieur, Space19+ s'est conclue par un immense succès pour le programme spatial européen. A Séville, l'ensemble des États membres a engagé sur trois à cinq ans, un montant supérieur à 14 milliards d'euros de nouveaux programmes, ce qui constitue un record absolu pour une telle Conférence. L'Europe réaffirme ainsi avec force sa place de deuxième puissance mondiale en concrétisant ses politiques ambitieuses d'accès à l'espace, d'exploration du système solaire et de maintien de la compétitivité de l'industrie européenne.

L'ESA a tout d'abord renforcé son rôle de leader mondial en matière scientifique, en augmentant le budget de son programme scientifique à 2.823 M€ pour la période 2020-2024. Cela permettra de continuer à rechercher des réponses aux questions fondamentales sur l'origine de la vie, le fonctionnement du système solaire, les origines de l'Univers et les lois physiques fondamentales de ce dernier. Les futures missions JUICE (exploration des lunes de Jupiter), Athena (télescope d'astrophysique haute énergie), LISA (observation d'ondes gravitationnelles) ou encore Euclid (étude de la matière noire) donneront corps à ces ambitions.

Concernant l'accès à l'espace, l'enveloppe souscrite (2.238 M€ pour les lanceurs et 512 M€ pour le Centre Spatial Guyanais (CSG) va permettre d'améliorer la compétitivité d'Ariane 6 et de Vega C, de développer les briques technologiques du futur avec le moteur Prometheus et de rénover le CSG. L'enjeu essentiel pour l'Europe du maintien de son accès indépendant à l'espace est parfaitement atteint.

Pour l'exploration, l'enveloppe souscrite financera les activités liées à la station spatiale internationale, à la Lune et à Mars, dans un contexte international marqué par les annonces américaines d'un retour sur la Lune dès 2024. Le programme E3P a ainsi été souscrit à hauteur de 1.953 M€, à un niveau suffisant pour lancer les activités dans les quatre piliers proposés : vol habité en orbite basse avec la confirmation des engagements européens en faveur de la station spatiale internationale ; vol habité au-delà de l'orbite basse dans le cadre de la station circumlunaire proposée par les Etats-Unis (Gateway) ; exploration robotique lunaire ; exploration robotique martienne avec notamment la future mission Mars Sample Return, qui aura vocation à ramener sur Terre des échantillons de sol martien.

Le maintien de la compétitivité industrielle se fera principalement au travers d'une part, des programmes d'observation de la Terre destinés à financer la future composante spatiale de Copernicus et les satellites d'observation du programme Future Earth Observation (Future EO) et d'autre part, du programme ARTES pour préparer l'avenir des télécommunications par satellites. Les programmes d'observation de la Terre ont été plébiscités, avec des souscriptions à hauteur de 2.541 M€, dont 545 M€ pour Future EO et 1.810 M€ pour le programme Copernicus cofinancé avec l'Union Européenne. Cela démontre une fois encore l'apport essentiel des applications spatiales dans la surveillance de l'environnement et la lutte contre le changement climatique. Le programme ARTES a, quant à lui, obtenu une enveloppe de 1.511 M€, afin de soutenir la compétitivité de l'industrie européenne dans le domaine très concurrentiel des satellites de télécommunications.

Les Etats membres ont également souscrit aux programmes liés à la sûreté et à la sécurité (Space Safety Programme) à hauteur de 432 M€. Ce nouveau programme découle d'une prise de conscience croissante des risques associés à trois menaces spatiales importantes. La mission L5 aura tout d'abord pour vocation d'améliorer notre connaissance et nos prédictions en matière de météorologie spatiale, puisque des phénomènes physiques tels que les éruptions solaires peuvent avoir des conséquences dramatiques sur le fonctionnement de nos économies. La mission Hera servira à tester des méthodes de déviation d'astéroïdes en orbite, afin d'être en mesure d'éviter de futures collisions avec la Terre. Enfin, la mission ADRIOS permettra de tester des technologies de retrait actif de débris spatiaux, en contribuant ainsi à rendre les orbites terrestres moins polluées et donc plus sûres pour les satellites.

Enfin, l'ESA confirme son rôle en soutien à la technologie (561 M€) et au développement d'expériences scientifiques (229 M€) avec les programmes GSTP et PRODEX. L'ESA joue en effet le rôle d'agence spatiale pour la plupart de ses États membres ne disposant pas de budgets nationaux dédiés et doit à ce titre continuer à investir dans les briques technologiques et scientifiques permettant de préparer l'avenir.

Ces résultats impressionnants sur les plans budgétaire et programmatique, confirment plusieurs tendances structurelles du spatial européen.

D'abord, le spatial est devenu une composante essentielle de nos économies et de nos sociétés. En tant qu'outil en soutien de quasiment toutes les politiques publiques (climat, environnement, sécurité, transports, agriculture, fracture numérique, recherche), le secteur spatial bénéficie désormais d'un soutien politique et budgétaire constant et conséquent de la part des décideurs politiques européens.

Ensuite, l'Europe n'est jamais aussi forte qu'en mettant les ambitions nationales au service de l'intérêt général européen. Ce sont les priorités scientifiques, programmatiques et industrielles de ses États membres qui, mises bout à bout de manière cohérente, forment un programme spatial européen d'envergure. Cela passe par une longue préparation des décisions, centrée sur la recherche du consensus, qui constitue la marque de fabrique du processus européen. La préparation de Space19+ a ainsi débuté il y a plus d'un an et a été rythmée de nombreuses réunions du Conseil de l'ESA et de ses comités de programme pour élaborer un paquet programmatique global, à la fois ambitieux et réaliste.

Enfin, Space19+ a été une réussite car l'Europe spatiale n'est pas restée repliée sur elle-même, mais a envisagé cet événement dans son contexte global. Toutes les décisions programmatiques de Space19+ peuvent ainsi se lire à l'aune du double prisme de la coopération et de la compétition. L'Europe a renforcé sa crédibilité en matière de science, d'exploration, d'observation de la Terre pour rester un partenaire international incontournable pour toutes les futures missions spatiales d'envergure dans ces domaines. De même, elle a fait le choix de l'innovation et de la compétitivité, notamment dans les télécommunications, les lanceurs ou l'observation de la Terre, afin de rester à la pointe de la compétition commerciale.

Au final, Space19+ apporte la plus belle des réponses aux sceptiques : l'Europe reste au centre du jeu spatial. ■

LE SÉMINAIRE DE PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DU CNES : LE SPATIAL AU SERVICE DES CONNAISSANCES ET DU CITOYEN

par Juliette Lambin, sous-directrice Sciences, Exploration et Observation au CNES



Les délégués du Séminaire de Prospective Scientifique du CNES, Le Havre, 10 octobre, 2019

Le Séminaire de Prospective Scientifique (SPS) du CNES s'est déroulé au Carré des Docks au Havre du 08 au 10 octobre 2019, en présence de près de 300 délégués représentant l'ensemble de l'écosystème des sciences spatiales françaises. Cet événement, se tenant tous les 5 ans, est un moment fort de la vie du CNES, puisqu'il scelle l'ultime étape de la réflexion de prospective scientifique, engagée avec le concours de ses partenaires depuis le mois d'août 2018. Il permet de projeter la réflexion programmatique au-delà de l'horizon des projets en cours, donc de préparer l'avenir du domaine sur des temps longs.

Sous la responsabilité du Comité des Programmes Scientifiques du CNES (CPS), ce travail de prospective a mobilisé plus de 200 experts dans la communauté scientifique et au CNES. Outre l'analyse des 225 contributions reçues en réponse à l'appel à idées émis en août 2018, 17 groupes de travail ont œuvré à proposer des recommandations sur différents aspects de la science spatiale française. Leurs travaux ont ainsi alimenté le riche rapport de synthèse de la prospective, « matière première » du séminaire, qui fera référence dans les années à venir comme la « prospective du Havre de 2019 », après celles de La Rochelle en 2014 et de Biarritz en 2009.

Lors du discours d'ouverture du séminaire, le Président du CNES Jean-Yves Le Gall a chaleureusement remercié l'ensemble des intervenants, les présidents des groupes de travail du CERES (Comité d'Évaluation sur la Recherche et L'Exploration Spatiale) et du TOSCA (Comité Terres Océans

Surfaces Continentales Atmosphère) pour leur intense travail préparatoire s'ajoutant à leur action permanente de conseil des instances scientifiques du CNES. Le rôle des groupes de réflexion transverse consacrés aux ruptures technologiques, à l'usage des données, aux nanosatellites, à la définition d'une stratégie pour la Science a également été souligné tant ils ont, par leurs analyses croisées, efficacement aiguillonné la communauté des interlocuteurs thématiques traditionnels. Jean-Yves Le Gall a aussi souligné le rôle des grands organismes partenaires (CNRS, CEA, IFREMER, IGN, INSERM, INRA, INSERM, IRD, IRSTEA, Météo-France, ONERA, etc.), qui ont mis leurs experts à disposition de cette entreprise.

Le SPS du Havre a accompagné le passage de témoin entre l'équipe sortante du Comité des Programmes Scientifiques (CPS), présidé par Jean-Loup Puget, et la nouvelle équipe sous la présidence de Gilles Bergametti.

LE SÉMINAIRE DE PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DU CNES : LE SPATIAL AU SERVICE DES CONNAISSANCES ET DU CITOYEN

Les membres du CPS sont en effet renouvelés tous les 5 ans. Outre le pilotage de la prospective scientifique, ils ont pour rôle d'éclairer le Conseil d'Administration du CNES sur la sélection et le suivi de ses programmes scientifiques.

Le Président du CNES a remercié Jean-Loup Puget et son équipe pour l'excellent travail réalisé depuis 2014. Ce fut indiscutablement une période extrêmement féconde dans le domaine scientifique, aussi bien en termes de résultats que de décisions de programmes, révélant la force de la politique spatiale de la France sur les temps longs. Cette période a également été celle d'évolutions fortes de l'écosystème spatial : émergence et foisonnement du New Space, multiplication du nombre d'acteurs internationaux et d'agences spatiales, montée en puissance du thème de l'exploration et du vol habité, arrivée en masse des données comme celles du programme européen Copernicus, etc. Et puis l'arrivée au premier plan mondial de la question climatique sur laquelle le CNES et la France ont mené des activités d'avant-garde avec les décisions de programme Microcarb (dédié à l'étude du cycle du carbone), Merlin (cycle du méthane), et la création du Space Climate Observatory (SCO) dans le sillage de l'initiative française du One Planet Summit.

Comme le CPS précédent, le nouveau comité est constitué d'un collège de 12 personnalités scientifiques, représentatif d'un équilibre destiné à représenter au mieux les différents thèmes de la communauté scientifique des sciences de l'Univers, des sciences de la Terre, des sciences de la vie et des matériaux. Signe fort également de la volonté d'assurer une représentation équilibrée de la communauté, sa constitution respecte strictement la parité hommes-femmes.

Les perspectives du nouveau quinquennat 2019-2024 s'annoncent enthousiasmantes. Les synthèses présentées par les différents présidents de groupes thématiques ont permis de cartographier (sans être exhaustif ici) les sujets émergents dans différents domaines (leur priorisation, sous la responsabilité du CPS, sera précisée dans un rapport à paraître) :

- **Pour l'étude du système Terre**, les enjeux identifiés conduisent à des propositions de missions visant, par des observations inédites ou par l'amélioration des performances actuelles, à mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes, la dynamique des zones littorales, l'impact radiatif des aérosols sur la santé publique, l'évolution du système climatique, l'interaction nuage/climat, la prévision des précipitations. Les systèmes proposés sont à même de favoriser le suivi des ressources agricoles, hydrologiques, des gaz à effet de serre (méthane et carbone) : autant de sujets qui nous ramènent presque systématiquement à l'omniprésence

de la question climatique et des changements globaux de notre planète et de ses ressources, et qui démontrent le caractère incontournable des techniques spatiales pour aborder ces questions à l'échelle globale ; qu'il s'agisse de la cartographie des variables climatiques essentielles, et plus largement la contribution aux Objectifs de Développement Durable (ODD).

- **Pour les sciences de l'Univers et de la matière**, la perpétuelle quête des origines reste le moteur des propositions (origine de l'Univers, du système solaire, du système Terre et de la vie) : traces du Big-Bang, formation des premières étoiles et des premières galaxies, recensement des sursauts gamma pendant le premier milliard d'années de l'Univers, retour d'échantillons martiens, observation de comètes primitives ou de géantes glacées, recherche des ondes gravitationnelles primordiales, études approfondies du soleil, transferts d'énergie au sein des fluides supercritiques, etc. sont quelques exemples de sujets qui seront au rendez-vous des prochaines années.
- **Pour les sciences de la Vie** enfin, l'instruction d'une série de questions cruciales, suscitées par les aspirations de l'Humanité à étendre sa présence à des domaines toujours plus grands et plus lointains, et qui obligeront à étudier à titre d'exemple la façon de maintenir les fonctions biologiques de l'humain ou du vivant pour l'exploration spatiale, lors des grandes odysées qui vont sceller le retour de l'Homme sur la lune dans un premier temps, puis le probable voyage vers Mars dans deux ou trois décennies. Des problématiques de très longs séjours dans l'Espace, qui nécessiteront parmi d'autres défis d'assurer la qualité nutritionnelle du végétal dans l'espace, et de caractériser et réduire les risques radio-biologiques pour l'Homme lors de longs séjours dans l'espace.

Pour étayer ces ambitions scientifiques, il conviendra aussi d'instruire et de progresser sur certains enjeux transverses, ciments indispensables à la construction des connaissances scientifiques. Gilles Bergametti en a énoncé les grandes lignes en fin de séminaire :

- Une implication plus soutenue dans la production de données à forte valeur ajoutée, en définissant le cadre adéquat pour leur valorisation. Des questions aussi déterminantes que le stockage de données toujours plus volumineuses, leur traitement et leur diffusion automatiques, fiables et instantanés, sont au cœur nos préoccupations... et il apparaît que la réponse ne pourra être que concertée entre les différents organismes nationaux et européens.
- Insister toujours davantage sur l'ambition technologique, autour de la miniaturisation des charges utiles, de leur modularité, de leurs capacités à embarquer de l'intelligence à bord, à intégrer des COTS (éléments

LE SÉMINAIRE DE PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DU CNES : LE SPATIAL AU SERVICE DES CONNAISSANCES ET DU CITOYEN

commerciaux non spécifiques au spatial) dans leur architecture pour réduire les coûts, également autour des constellations de petits satellites pour atteindre d'autres mesurables et d'autres sensibilités à travers la notion de mesure répartie sur des plateformes dont on maîtrise parfaitement la géométrie de constellation et les protocoles de transfert de temps et de données.

- Avoir une vision amplifiée du partenariat tant international qu'inter-organismes et universités : dans un contexte où la ressource publique est très contrainte, la logique partenariale inter-organismes est plus que jamais nécessaire pour édifier « l'équipe de France du spatial », et porter dans un contexte internationalisé les meilleures offres nationales.

En guise de conclusion, il convient une fois de plus de souligner l'importance primordiale que joue et que jouera la Science pour l'essor et la visibilité des activités spatiales en France, par sa capacité à fixer le cap sur des temps longs, et donc sur la stratégie de programmation du CNES, ainsi que sur les positions françaises qu'il portera à l'Agence Spatiale Européenne : la Science, dans son acception la plus large (Terre, Univers, Matière, Vie, Exploration) est un moteur fondamental des activités du CNES. Le travail de prospective qui s'achève est son guide dans un monde qui se complexifie.

Le séminaire du Havre nous fait entrer dans une période tout aussi passionnante et ambitieuse que la précédente, au service des connaissances et des citoyens de l'Humanité. Et c'est bien à cette échelle de l'Humanité que doit se porter l'ambition de plus-value de la science spatiale, tant les sujets que nous abordons collectivement, de la question climatique à celle des origines de l'Univers ou de l'odyssée vers Mars, revêtent une allure universelle.
<https://sps2019.com/> ■

POINTS DE VUE

LES ENJEUX D'UN RENOUVEAU DU DROIT DE L'ESPACE. PARTIE 1 : UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ESPACE ET SES ENJEUX JURIDIQUES

par **Philippe CLERC**¹, Référent Conformité et Ethique au CNES, membre de la Commission stratégie et affaires internationales de la 3AF, membre émérite 3AF

RÉSUMÉ INTRODUCTIF

Deux grandes tendances nous amènent aujourd'hui à repenser l'évolution du droit des activités spatiales. La première est d'origine économique et coïncide avec la privatisation puis l'arrivée de nouveaux acteurs sur ce secteur. La seconde, plus classique, découle des nouveaux équilibres sur la scène politique et stratégique internationale avec notamment un retour des grandes ambitions des États pour l'exploration spatiale.

La pression économique émane d'un secteur spatial commercial et industriel qui a aujourd'hui acquis sa maturité et affirme ses propres ambitions après avoir traversé deux vagues de privatisations consécutives à l'échelle mondiale. La première privatisation s'était appliquée à partir des années 1980 au secteur spatial

traditionnel et à ses applications. La seconde est portée depuis le début de notre siècle par des acteurs venus de la nouvelle économie et du numérique, dont certains parmi les GAFAM². Ce phénomène est commenté communément sous le nom de New Space.

Parallèlement, les grandes puissances traditionnelles ou celles en devenir se mobilisent pour l'exploration spatiale, en particulier pour un retour de l'homme sur la Lune et sa présence sur Mars. Cette situation relance la question de l'exploitation, par les États ou à des fins privées, des ressources extra-terrestres de ces planètes ou des astéroïdes au regard des principes de non appropriation de l'espace extra-atmosphérique et des corps célestes et de la protection planétaire qui ont été consacrés par le traité sur l'Espace Extra Atmosphérique de 1967.

¹ Les analyses et opinions figurant dans cet article n'engagent que son auteur.

² GAFAM : Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft, cinq grandes firmes américaines fondées entre le dernier quart du XXe siècle et le début du XXIe siècle qui ont pris la domination du marché de l'économie du numérique.

LES ENJEUX D'UN RENOUVEAU DU DROIT DE L'ESPACE : UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ESPACE ET SES ENJEUX JURIDIQUES

Ces enjeux nous amènent à envisager de nouveaux schémas de relations entre les agences gouvernementales et spatiales et un secteur économique qui aspire profiter pleinement de ces nouvelles opportunités, chacun suivant sa propre logique d'innovation et de conquête. Ces nouvelles tensions entre souverainetés nationales et économiques peuvent s'accompagner d'actes d'espionnage, de tentatives de sabotage ou d'actes de piraterie qui conduisent des grandes puissances comme les États-Unis ou la France à déclarer une doctrine de légitime défense visant à prévenir l'action de satellites tiers aux comportements inamicaux ou malveillants.

Cette étude suit deux cheminements diamétralement opposés. Le premier analyse les ressorts de cette nouvelle donne en termes de risques et d'opportunités juridiques. Le second analyse les atouts et les limites actuelles du droit spatial au prisme de ces mêmes enjeux. S'y enchaîne une synthèse ouvrant à de nouveaux chantiers juridiques répondant aux grands besoins exprimés.

Ce numéro 40 est consacré à la première partie de cet article qui s'intitule donc « une nouvelle donne et ses enjeux juridiques. »

LA PRESSION DES ACTEURS ÉCONOMIQUES

Les activités spatiales à vocation économique ont connu deux vagues de privatisation au cours de ces trente dernières années avec des causes et des conséquences assez différentes politiquement et juridiquement.

La première vague de privatisation du secteur spatial (1980-2000)

Cette privatisation résulte de la dérégulation mondiale des télécommunications, avec la disparition du pouvoir réglementaire et du monopole commercial des opérateurs traditionnels, alors de statuts publics, qui se propageait sur leurs systèmes spatiaux nationaux et leurs organisations internationales (Intelsat, Eutelsat, Inmarsat, Intersputnik, etc.). A cette situation s'ajoutait, suite à l'effondrement du mur de Berlin, l'arrivée d'une concurrence sur le marché commercial de lanceurs institutionnels de l'ex URSS qui défait la domination du premier opérateur commercial européen, Arianespace créé en 1980, pour exploiter le lanceur éponyme développé par l'Agence Spatiale Européenne, (ESA) sous un management technique et contractuel délégué au CNES.

Cette privatisation décline en mode « Privé » les outils juridiques existants.

La concession au Privé

Cette privatisation pouvait d'abord se résumer à un transfert, vers des acteurs du secteur privé, de systèmes et services associés conçus, financés et opérés à l'origine par des acteurs du secteur public, que ce soit des agences spatiales ou des opérateurs publics en place.

Cette période a vu également émerger les premières initiatives privées de satellites d'observation civils à haute résolution et des constellations de satellites de télécommunication en orbites basses ou intermédiaires pour des usages mobiles (Iridium, Globalstar, etc.) ou pour l'internet à haut débit (Télédesic, Skybridge, etc.).

Ces projets alternatifs ont mobilisé d'importants investissements pour l'époque mais n'ont pas rencontré le succès économique escompté pour diverses raisons : la bonne résistance des opérateurs traditionnels des satellites géostationnaires toujours protégés par leur monopole légal ou de fait sur leur marché national, les derniers obstacles réglementaires du droit des télécommunications et de l'accès au spectre des fréquences radioélectriques, ceux liés à la défense pour l'observation de la Terre et les exportations sensibles, une arrivée trop tardive avec des systèmes peu attractifs sur le marché, notamment sur celui des mobiles déjà dominé par le GSM terrestre et enfin, et surtout, les conséquences du crash économique du début des années 2000 lié à l'éclatement de la « bulle internet » ! Cette crise destructrice de valeurs a conduit les principaux opérateurs généralistes de télécommunications à se recentrer sur les réseaux terrestres (hertzien, GSM, fibre optique, etc.), se désengageant du spatial au profit des grandes entreprises de l'orbite géostationnaire devenues alors privées (Eutelsat, SES, Intelsat, Inmarsat, etc.).

Le partenariat au Privé

Ces projets d'initiative privée ont toutefois amorcé une modification profonde et irréversible des relations juridiques et contractuelles entre les acteurs gouvernementaux et privés. Des premières formes de partenariat public-privé ont émergé avec les agences gouvernementales, lesquelles ne pouvaient plus intervenir comme « autorité de conception » ou « donneur d'ordre » sur des systèmes commerciaux opérant dans un marché désormais libéralisé par les textes européens et mondiaux.

En France, le CNES a inauguré, à la fin des années 90, une politique volontariste de partenariat pour le développement et l'exploitation de systèmes à la fois publics, civils, défensifs et commerciaux. Parmi eux, on peut citer la plateforme multi-mission Proteus, la constellation internet Skybridge, le système d'observation

LES ENJEUX D'UN RENOUVEAU DU DROIT DE L'ESPACE : UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ESPACE ET SES ENJEUX JURIDIQUES

multi-usagers Pleiade, etc. Cette nouvelle politique de partenariat sera consignée dans un « guide » dédié, finalisé en 1988 en concertation avec les divers partenaires du CNES, et notamment ceux du Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales (GIFAS).

Les schémas retenus préfigurent la formule de « partenariat d'innovation » qui sera consacrée plus de vingt ans après, pour tout secteur, par une directive européenne, elle-même retranscrite en France par l'ordonnance du 23 juillet 2015 au sein du Code de la commande publique³.

Un tel dispositif peut donc désormais être utilisé en toute sécurité juridique par les pouvoirs publics pour développer tout projet innovant porté par le secteur industriel et commercial.

La législation au Privé

La privatisation a également abouti à l'émergence des premières législations nationales, telle que la loi sur les opérations spatiales du 3 juin 2008 (LOS) en France.

On peut qualifier ces lois « d'ordre public » ou de « régaliennes », en ce qu'elles conditionnent l'accès au marché à la délivrance de licences ou d'autorisations basées sur des critères administratifs et de sécurité édictés dans l'intérêt général pour garantir la sécurité des systèmes et des procédures mis en œuvre et une protection de l'environnement terrestre et spatial.

Les États ont ainsi consolidé, par un cadre générique et permanent, les conditions juridiques et techniques de leur dispositif interne d'autorisation, d'immatriculation et de contrôle afin de permettre au secteur privé d'opérer ses systèmes spatiaux sur des bases non discriminatoires, transparentes et prévisibles, avec une garantie juridique et financière de l'État pour les dommages aux tiers, le tout dans le respect des traités internationaux sur l'Espace.

C'est en cela aussi que ces lois s'inscrivent également dans le cadre du droit économique⁴.

L'avènement de la nouvelle économie ou du New Space (2000...)

La seconde vague de développement du marché, désignée sous le terme New Space, est d'une autre essence. Elle est portée par des acteurs confirmés et puissants économiquement du secteur des nouvelles technologies

et de l'économie numérique aux États-Unis, dont certains émanant des GAFAM.

L'économie numérique s'invite dans l'industrie spatiale

Ces nouvelles entreprises sont conduites par des leaders emblématiques et décomplexés, parmi lesquels on peut citer Elon Musk, Jeff Bezos, Greg Whyler, Richard Branson. Ces acteurs ne sont pas tous de nationalité américaine et peuvent aussi s'appuyer dans leurs entreprises sur des partenaires étrangers et notamment européens.

Toutefois, pour ce qui nous intéresse ici sur le plan juridique, tous leurs projets restent intégralement sous contrôle de la juridiction des États-Unis, notamment en ce qui concerne les restrictions d'exportation et d'importation des systèmes spatiaux, les échanges de technologies, l'embauche et le statut des personnes.

Ces nouveaux entrepreneurs se sont érigés comme les modèles, pour la Silicon Valley, du mouvement libertarisme et d'une philosophie très largement inspirée du fameux roman d'Any Rand, *Atlas Shrugged*⁵.

L'autorité de conception au Privé

Ils se positionnent d'abord en dehors des relations et des pratiques des autres parties prenantes du secteur traditionnel de l'aérospatial et de la défense qui avaient vu le jour à partir des années 1960 grâce aux politiques industrielles des agences gouvernementales sur un modèle de commande publique autour de grands programmes.

Les entreprises du New Space se défient en particulier des spécifications de management qui ont été établies par les agences et administrations gouvernementales pour maîtriser les risques et garantir une sécurité maximale des programmes et systèmes spatiaux sous leur contrôle, mêmes lorsque privatisés.

Ces nouveaux entrepreneurs prônent au contraire la reconnaissance d'un droit à l'échec et à la prise de risque pour leurs projets et technologies d'innovation. Dans la même lignée, ils critiquent les régulations techniques en vigueur en ce qu'elles se basent sur les normes de systèmes anciens, dépassées à leurs yeux, ayant aussi pour conséquence de protéger la situation économique des acteurs en place.

Cette défiance soulève la question de la neutralité technologique que doivent respecter les réglementations

³ Article L2172-3 du code de la commande publique.

⁴ Le droit économique est la branche du droit des affaires du droit public.

⁵ En français *la Grève ou la Révolte d'Atlas*, roman publié par Any Rand en 1957.

LES ENJEUX D'UN RENOUVEAU DU DROIT DE L'ESPACE : UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ESPACE ET SES ENJEUX JURIDIQUES

ou les spécifications administratives au regard du droit de la concurrence et des aides publiques.

On retiendra à cet égard au bénéfice de la France, que la Commission Européenne a reconnu explicitement, préalablement à l'entrée en vigueur de la loi sur les opérations spatiales de 2008 (LOS), la conformité de sa réglementation technique et de sa garantie accordée aux opérateurs privés pour les dommages causés aux tiers.

Cette prévention du New Space à l'égard du « régulateur » doit aussi s'apprécier, selon la conjoncture et les règles propres à ce secteur des nouvelles technologies, suivant la célèbre formule *the winner takes it all* (le gagnant rafle la mise). Toutes ces entreprises sont lourdement endettées et continuent aujourd'hui de perdre beaucoup d'argent pour se positionner sur leur marché émergent, incertain et très concurrentiel. L'objectif est donc d'être au plus vite le premier, d'éliminer la concurrence, et de récupérer et valoriser son investissement en dominant le marché. En attendant, elles s'opposent à l'unisson à toute barrière réglementaire susceptible de freiner leur développement.

Une autre caractéristique plus positive sur le plan juridique, tient en ce que ces entrepreneurs, figures de proues des libertariens, se déclarent dans le même temps profondément attachés aux grands principes du droit et de l'éthique des affaires. Ceci vise en particulier la liberté, la démocratie, la responsabilité, le respect de l'individu, la non-discrimination, l'environnement, les fondements des traités de l'ONU sur l'espace.

On peut s'interroger sur la sincérité d'un tel discours, mais il n'en est pas moins engageant puisqu'il est récurrent, largement étayé et diffusé publiquement.

Il faut donc retenir au moins que leur défiance se focalise davantage sur les réglementations et l'interventionnisme technique et administratif que sur le pouvoir législatif qui les encadre à un plus haut niveau de la norme juridique.

Se joue là d'ailleurs un potentiel conflit d'initiative entre les pouvoirs du parlement et du gouvernement pour une réécriture du droit de l'Espace.

Des systèmes « ré », « mega » et combinés au Privé

S'agissant des systèmes spatiaux proprement dits, ces acteurs en maîtrisent aujourd'hui les codes, de la conception, de la fabrication et des services, en y apportant de nouvelles ressources financières, humaines et des méthodes et cycles industriels disruptifs.

Leurs systèmes ont été d'abord développés à partir de technologies *low cost* et éprouvées, enrichies par des apports de l'industrie numérique (miniaturisation, impression 3D, intelligence artificielle). Ils sont produits de façon centralisée, à coût réduit, avec une plus grande tolérance aux risques et à l'échec, tout du moins tant que les aléas n'affectent pas l'équilibre global ou la réputation de leur modèle économique.

Forts des premiers succès sur le marché, ils s'orientent maintenant vers des méga-constellations de nano-satellites non pilotables, des engins ou composants réutilisables, des services en orbite entre différents véhicules, l'exploitation minière des astéroïdes, le transport suborbital, les vols habités et les missions lunaires et martiennes. Ces derniers domaines d'exploration demeuraient le monopole des grandes puissances sous la conduite de leurs agences spatiales.

Leurs projets de constellation et d'exploitation de ressources non renouvelables représentent une menace environnementale sérieuse avec les risques de prolifération des débris et de collisions en chaîne en orbite et de contamination des planètes et astéroïdes concernés. Ils déclarent toutefois maîtriser de tels risques et les assumer devant les victimes potentielles. Ils mettent dans la balance écologique leurs autres engagements en faveur du « ré » : (le réutilisable, du réparable, le réapprovisionnement) et de la fabrication en orbite.

Il faut reconnaître à cet égard que leurs premiers résultats prometteurs dans cette voie ont créé une grande surprise chez les agences, les industriels et autres investisseurs spatiaux en place qui, face aux risques et contraintes techniques, physiques ou économiques pesant sur les activités spatiales, avaient construit un modèle reposant principalement sur le jetable ou le consommable en orbite.

Nouveaux services, nouvelles relations économiques et juridiques

En tout état de cause, cette nouvelle donne du « ré... » va inévitablement entraîner une révolution aux plans juridique et contractuel pour tout le secteur spatial, y compris celui des assurances et du secteur financier associé.

Comptablement, les véhicules spatiaux vont apparaître dans le bilan des entreprises et le calcul des résultats comme des immobilisations amortissables et non plus comme des biens consommables.

Les autorisations gouvernementales d'opérer, et les droits et garanties attachés, ne pourront plus être limités à une seule phase de lancement ou de maîtrise en orbite

LES ENJEUX D'UN RENOUVEAU DU DROIT DE L'ESPACE : UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ESPACE ET SES ENJEUX JURIDIQUES

comme aujourd'hui. Des systèmes de nationalités ou d'autorisations gouvernementales distinctes pourront et devront désormais interagir entre eux en orbite, notamment pour être remis en état (cf. OSS On-Orbit Services) ou pour être évacués en fin de vie ou comme débris (cf. ADR, Active Debris Removal).

Enfin, le droit des obligations et de la responsabilité devra être reconsidéré entre les parties, vis-à-vis des tiers et des États de lancement ou d'immatriculation concernés. En effet, à partir du moment où il devient possible d'établir la preuve d'un dommage en orbite, où qu'un prestataire vend un véhicule réutilisable ou un service complet de transport avec ce véhicule, le client ou ses assureurs obtiennent un droit légitime à exiger une garantie de résultat ou une réparation face à des vices cachés ou autres inexécutions comme dans tout autre contrat de vente ou de transport professionnel.

Le régime de responsabilité pour faute en orbite reste d'ailleurs à préciser à ce jour, faute de jurisprudence ou d'un besoin urgent exprimé par les diverses parties prenantes. Il ne fait donc pas l'objet de consensus international, ni dans les législations, ni dans les pratiques commerciales.

Rappelons que la faute, selon une conception générale en droit civil, se définit comme un manquement à une obligation légale ou contractuelle. Ainsi la caractérisation de la faute en orbite nécessite, qu'au préalable, soient déterminées avec précision les obligations respectives des parties. Cette question devient indissociable des réflexions à mener en vue de l'établissement d'un système de gestion mondiale du trafic des véhicules spatiaux (STM, Space Traffic Management) autrement dit d'un futur code de circulation en orbite. Cela vaut aussi pour mettre en place des standards communs d'évitement des collisions avec des mécanismes d'échanges des données de positions orbitales entre les différents opérateurs (SSA, Space Situational Awareness). Ceci suppose également une harmonisation des mesures de prévention de débris tant pour limiter leur génération que pour atténuer leurs effets (au sens de mitigation). C'est en effet en édictant des règles et usages de circulation clairs et communément partagés entre tous les opérateurs dans le monde que l'on pourra, en cas d'accident, sanctionner celui qui aura manqué à son obligation préexistante de maîtrise, d'évitement voire de limitation des effets.

Il est inévitable aussi que la pression de la concurrence, des investisseurs et le souci d'une bonne gestion des deniers publics vont conduire à la remise en cause des règles et usages en vigueur limitant la responsabilité des opérateurs et de leurs fournisseurs entre eux, et vis-à-vis des tiers, des assureurs ou de l'État (garanties, clauses de non-recours, porte-fort, etc.) notamment en cas de faute caractérisée, de mauvaise foi ou de grave négligence des premiers. Il faut en effet noter qu'actuellement seule une faute intentionnelle est de nature à priver les opérateurs de la garantie de l'État ou du bénéfice des clauses de non-recours entre les partenaires commerciaux.

Dans le même temps, il conviendra certainement d'étendre aux services en orbite qui participent à l'intérêt général les garanties des États, qui couvrent actuellement les opérateurs privés pour les seuls risques de lancement ⁶.

Space Reimbursement Agreements au Public

Sur le registre du droit économique et des relations avec les agences spatiales et les autres « donneurs d'ordre publics », les entreprises du New Space revendiquent également un accès à la ressource publique mais sous d'autres formes. Plutôt que de se soumettre à la commande publique pour le soutien à leurs activités de recherche technologique et de développement précompétitifs, elles préconisent de nouvelles formes de partenariat public-privé ou l'octroi de subventions directes.

Ils privilégient également des contrats à long terme portant obligation de résultat pour une livraison de véhicules ou de systèmes clés en main à un coût pré-déterminé en gardant la maîtrise de la conception du développement et de la fabrication. C'est le modèle suivi avec succès par Space X et Blue Origin dans le cadre des programmes Commercial Orbital Transportation Services (COTS) et Commercial Crew & Cargo Program (CC&CP) de la NASA.

Sont également bienvenues les interventions publiques sous forme d'abondement à des fonds d'investissement ou d'amorçage pour les jeunes pousses qu'elles pourront ensuite absorber.

Ils souhaitent aussi bénéficier d'un accès gratuit ou à un coût marginal aux installations publiques sol (bases de lancement, réseaux de stations de poursuite, etc.) en invoquant le principe d'égalité pour l'accès aux infrastructures et aux services publics ⁷, mais en posant leurs

⁶ LOS articles 13 à 18.

⁷ En ce sens, le gouvernement des États-Unis a incité la NASA à ouvrir ses installations suivant la formule des Space Act Agreements (SAAs), moyennant un juste remboursement des coûts occasionnés pour l'agence (cf. Space Agreement Guide – NASA Advisor Implementation - Instruction NAlI 1050 -1-C last Update 11/08/2014).

POINTS DE VUE

LES ENJEUX D'UN RENOUVEAU DU DROIT DE L'ESPACE : UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ESPACE ET SES ENJEUX JURIDIQUES

propres spécifications ou conditions afin de s'exonérer autant que faire se peut de la tutelle et des modes de gestion administratifs.

Big data augmenté au Privé

Enfin, c'est sur un autre registre, celui des données et de la maîtrise des droits incorporels (propriété intellectuelle), que la stratégie hégémonique de ces entreprises s'exprime le plus clairement.

Elles revendiquent en effet de façon systémique un accès libre et universel à l'ensemble des bases de données publiques, qu'elles soient administratives, scientifiques ou techniques (open data). Elles reproduisent en fait, à l'égard des données spatiales, la recette qui a fait le succès originel des GAFAM quelques décennies auparavant pour les autres données.

Elles se sont d'abord imposées dans le monde occidental comme les principaux guichets d'accès à ces données pour tous les demandeurs, mêmes institutionnels, en bénéficiant d'un accès ouvert et gratuit aux différentes sources de données publiques et privées. Elles y ajoutent leur capacité de traitement en volume, la plus-value liée au croisement des différents flux d'information publics, personnels et professionnels et la qualité et la convivialité de leurs interfaces avec les utilisateurs.

Prises dans leur ensemble, elles se posent en situation de monopole universel et privé par leur maîtrise de l'ensemble des données et par une appropriation exclusive de la propriété intellectuelle des technologies clés y afférant.

Elles étaient déjà les acteurs incontournables sur le marché de l'information. Elles se positionnent aujourd'hui sur les infrastructures spatiales à couverture globale, les constellations de satellites pour l'internet à haut débit par exemple. Leur expertise pourrait aussi s'étendre aux données orbitales de tout satellite et les mettre en situation de proposer un système global ou indépendant de surveillance ou d'anti-collision.

La maîtrise de l'espace leur apporte une dominance informationnelle augmentée.

Dominance spatiale au Privé

Enfin, cette maîtrise de l'espace pourrait les tenter de se constituer des domaines d'extraterritorialité dans l'espace qui échapperaient à toutes les juridictions et lois de source terrestre. Un système spatial pouvant être

utilisé par exemple comme plateforme pour des transactions contractuelles, bancaires, ou financières voire pour la création de monnaie de façon autonome ou communautaire !

Pour l'exemple, c'est l'une des caractéristiques d'un projet, bien qu'improbable toutefois, qu'est le Royaume spatial d'Asgardia. Il s'agit de créer ex nihilo une nation basée sur le territoire d'un nano-satellite lancé dans l'espace extra-atmosphérique. Ses promoteurs invitent dès aujourd'hui toutes les personnes intéressées à s'inscrire, contre rémunération, comme citoyen de cet État (recevant un passeport) dans le but de formuler une requête de reconnaissance d'État devant les Nations Unies. Cet État pourrait alors créer un nouveau cadre juridique international indépendant des autres États et régissant toute activité spatiale, pour les personnes, société et communautés qui y seraient soumises⁸.

De manière plus vraisemblable, certains observateurs ont pointé de tels risques avec le projet privé Libra de cryptomonnaie et de monnaie virtuelle initié en 2019 par Facebook, lequel par ailleurs avait affiché des ambitions spatiales avec son projet de satellite Athena.

En tout état de cause, cette nouvelle donne sur la maîtrise globale de l'information grâce aux moyens spatiaux dépasse les enjeux propres au droit des activités spatiales.

Ces enjeux intéressent le droit de l'information, des télécommunications numériques et plus généralement les droits universels des individus, la souveraineté et la juridiction des États.

Ces menaces et opportunités justifient donc une action volontariste de la part du législateur pour permettre le bon développement de cette nouvelle économie tout en déterminant les contours de l'intervention de l'administration et de ses agences pour le respect de l'intérêt général, que ce soit via la législation spatiale, sur les conditions d'autorisations des opérations, que par l'adaptation du droit économique impactant les activités spatiales et leurs applications sur Terre.

LES NOUVELLES AMBITIONS DES PUISSANCES SPATIALES

L'accroissement des investissements institutionnels et civils

Cette démocratisation de l'accès à l'espace et les ambitions des majors de la nouvelle économie spatiale, ne

⁸P. Barthelemy, « Bienvenue à Asgardia », RDAS, Chronique de Droit Spatial, vol ; 282, n°2, 2017, P. 147 et s.

LES ENJEUX D'UN RENOUVEAU DU DROIT DE L'ESPACE : UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ESPACE ET SES ENJEUX JURIDIQUES

remettent pas en cause le rôle prépondérant des États et de leurs agences pour le financement et la conduite des nouvelles activités spatiales, qu'elles soient scientifiques, militaires, civiles et d'intérêt général (météorologie, observation, navigation, gestion du trafic, etc.) ou précompétitives visant les marchés en devenir.

Sans entrer dans le détail des chiffres, on retiendra que l'investissement public dépasse toujours très largement l'investissement privé dans ce domaine, et ce partout dans le monde.

Les puissances spatiales augmentent même significativement leurs budgets spatiaux civils et militaires.

Ces budgets seront affectés en quasi-totalité, moins les frais de fonctionnement d'agence, à l'industrie tant pour assurer le développement, la fabrication que l'exploitation en orbite et la fin de vie.

Ce n'est donc pas le principe d'une intervention massive de la puissance publique dans les activités spatiales civiles et économiques qui est remis en cause politiquement et juridiquement mais les conditions d'une telle intervention à l'égard d'un secteur spatial devenu mature dans son domaine technologique et sur son marché en concurrence avec d'autres acteurs économiques spatiaux ou d'autres secteurs (télécommunication, transports, énergie, numérique, BTP, etc.).

Il convient en particulier d'adapter les modes d'intervention des agences spatiales que sont les marchés et contrats, les partenariats, le soutien à la recherche technologique, la création d'entreprises ou de filiales, les subventions, etc. à une situation où celles-ci ne sont plus les autorités de conception ou de régulation relativement à ces activités ou industriels.

Cette évolution a déjà été anticipée avec succès par le CNES, en France et dans ses coopérations internationales et européennes, et ce dès la première vague de privatisation des années 80-90 comme rappelé ci-avant.

Il convient donc et surtout de capitaliser l'expérience acquise en la codifiant dans des instruments juridiques standards, lisibles et attractifs. On pourra en cela s'inspirer utilement du modèle de *Space Act Agreement*⁹ qui a permis à la NASA de conserver son autorité comme agence tout en sécurisant les relations juridiques avec des grands acteurs rivaux du New Space de ce pays.

Cette problématique relève plus généralement de l'évolution du droit spatial économique.

Les nouveaux enjeux de défense dans l'espace

Les États affichent également leur détermination face aux risques d'une arsenalisation rampante de l'espace.

Cette menace a été rappelée récemment en France par la Ministre des armées, Florence Parly, en dévoilant les comportements inamicaux d'un satellite espion Russe Luch Olymp.

Des satellites peuvent en effet aussi être conçus ou équipés pour espionner, brouiller, éblouir, gêner, neutraliser ou détruire des capacités spatiales stratégiques qu'elles soient militaires, civiles ou commerciales.

Pour maîtriser ces risques, la France vient de se doter d'une stratégie de défense plus *intégrée et active*¹⁰ tout en se gardant de s'engager dans une course aux armements ou le déploiement d'armes de destruction massive, pour rester dans le cadre autorisé par le Traité de l'Espace 1967.

Cette intégration doit d'abord s'opérer au niveau gouvernemental en créant des synergies avec les agences civiles (CNES et partenaires européens, ESA, etc.). Il est aussi envisagé de s'appuyer sur les moyens et services des « opérateurs de confiance » dans le secteur industriel et commercial.

Cette nouvelle doctrine va aussi conduire à des évolutions législatives, à commencer par une modification de la loi du 2 juillet 1934 fixant l'organisation générale l'Armée de l'air, qui deviendra à terme l'Armée de l'air et de l'espace avec la création d'un commandement dédié.

Cette évolution impactera également les conditions d'application, pour ces activités de défense, de la loi actuelle sur les opérations spatiales du 3 juin 2008 (LOS).

En effet, de telles opérations n'y sont pas mentionnées spécifiquement par la LOS. L'article 26 qui s'y réfère précise seulement que le lancement et le guidage des missiles n'y sont pas soumis, ce qui est une évidence puisqu'il ne s'agit pas d'opérations spatiales au sens de cette même législation.

Cette adaptation législative devra s'apprécier au regard du principe de séparation des pouvoirs organisée par la Constitution. S'il revient à la loi de déterminer les principes fondamentaux de l'organisation générale de la Défense

⁹ <https://www.nasa.gov/partnerships/about.html>

¹⁰ Discours de la Florence Parly, La nouvelle stratégie spatiale de défense le 25 juillet 2019 à la base aérienne de Lyon Mont-Verdun.

POINTS DE VUE

LES ENJEUX D'UN RENOUVEAU DU DROIT DE L'ESPACE : UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ESPACE ET SES ENJEUX JURIDIQUES

nationale, les attributions des tutelles ministérielles et l'organisation interne de chaque ministère relèvent, quant à elles, du pouvoir réglementaire du gouvernement et des ministères qui en sont chargés, à savoir pour les affaires de défense, le Secrétaire général de la sécurité et de la défense nationale (SGDSN) sous l'autorité du Premier ministre et le Ministère des armées.

Cette nouvelle stratégie de défense active va aussi s'affirmer dans les débats internationaux, européens et internes, qui se sont engagés avec les acteurs civils gouvernementaux et les opérateurs commerciaux au sujet de la surveillance de l'espace et de la prévention des collisions en orbite (STM et SSA).

Enfin, au-delà du développement du droit spatial régalién, la défense ne manquera pas de contribuer à celui du droit économique auquel elle a déjà apporté beaucoup d'innovations en Europe. C'est en effet la défense qui est à l'origine des premiers partenariats publics-privés multilatéraux sur des systèmes intégrés, notamment au début

des années 2000 pour le développement et l'exploitation des projets Paradigm ou Athena-Fidus sur les télécommunications, ou Pléiades pour l'observation de la Terre.

En ce sens, il conviendra de préciser le cadre juridique d'intervention des agences compétentes, la DGA et le CNES, vis-à-vis des projets conçus, développés ou opérés sous la responsabilité des entreprises concurrentielles qualifiées de partenaires de confiance pour ce qui concerne les marchés publics, les modèles de partenariats, les participations financières, les subventions, les services rendus, etc. La question de la garantie de l'État en cas de dommage au bénéfice de ces activités de défense ou mixtes sera également posée.

La partie 2 consacrée aux atouts et limites actuelles du droit spatial, suivie d'une synthèse sera publiée dans la lettre n°41. ■

POINTS DE VUE

RÉVOLUTION ET RESPONSABILITÉ : LES DÉFIS DE L'ESPACE

par Jacques Arnould, CNES

« Deux choses remplissent le cœur d'une admiration et d'une vénération toujours nouvelles et toujours croissantes, à mesure que la réflexion s'y attache et s'y applique : le ciel étoilé au-dessus de moi et la loi morale en moi. » Sans doute cette citation d'Emmanuel Kant est-elle plus familière aux lecteurs de la *Critique de la raison pratique* et aux philosophes qu'à ceux qui scrutent le ciel ou s'y aventurent... Elle mérite pourtant d'être prise au sérieux par les uns comme par les autres, tant elle résume, aussi brièvement que brillamment, la situation dans laquelle nous nous trouvons, nous les humains, en ce début de XXI^e siècle.

JAMAIS AUTANT D'ÉTOILES

Je m'associe bien volontiers aux astronomes, amateurs et professionnels, qui lancent aujourd'hui un cri de colère et un appel au secours, afin d'endiguer la vague de pollution lumineuse qui ne cesse de s'étendre sur les zones habitées de notre planète et dans le ciel au-dessus d'elles : observer une étoile depuis un balcon en ville est presque devenu une prouesse ! Toutefois, nous n'avons jamais été entourés par autant d'étoiles. À défaut de

pouvoir aisément nous enivrer au spectacle de la voûte constellée (sauf à nous offrir un séjour sur un territoire suffisamment vierge de présence et d'activités humaines), nous pouvons nous laisser bercer par les chiffres alignés par les astronomes : l'univers observable compterait entre 100 et 200 milliards de galaxies, chacune d'entre elles rassemblant plusieurs centaines de milliards d'étoiles. Ainsi notre univers hébergerait-il autant d'étoiles que notre Terre compte de grains de sable. Et je ne parle pas des planètes qui pourraient tourner autour de chacun de ces astres et dont Alfred Vidal-Madjar aime à dire qu'elles commencent à « pleuvoir ». Ainsi, sans nous en rendre compte, nous vivons depuis quelques décennies une véritable seconde révolution copernicienne.

Au début du XVII^e siècle, les astronomes, encouragés par les travaux de Nicolas Copernic, décédé cinquante ans plus tôt, et les découvertes de Galilée, avaient brisé le bel ordonnancement qui présidait depuis l'Antiquité aux affaires du ciel : la Terre au centre, entourée de sphères de cristal à la surface desquelles circulaient des planètes bien connues. Grâce à la lunette astronomique et aux calculs mathématiques, il fallut se résoudre à penser le

ciel comme une sphère dont le centre est partout et la circonférence nulle part, une sphère qui ne possède pas de limites et pourrait même être infinie.

Avec les siècles, notre situation astronomique ne s'est donc guère améliorée : après l'échelle spatiale, c'est l'échelle temporelle qui a subi une extension tragique pour ceux qui espéraient, croyaient que l'humanité occupait une place singulière au sein de la réalité. Il est désormais question d'un univers âgé de près de 13 milliards d'années et toujours en expansion depuis une « singularité », un big bang originel. Au final, le « tableau » brossé par les astronomes est devenu aussi enivrant que la voûte étoilée elle-même.

UN PAS EN AVANT, UN PAS DE CÔTÉ

Dans un tel contexte, n'est-il pas étonnant que l'espèce humaine ait entrepris d'explorer, de conquérir ce que nous avons aujourd'hui coutume d'appeler l'espace (pour espace extra-atmosphérique) ? Et qu'elle caresse ce rêve depuis le XVIIe siècle ? Loin de subir la révolution copernicienne, loin de la considérer comme la chute de la « monarchie » humaine, la fin des revendications humaines sur une réalité considérée comme l'œuvre d'un Créateur divin ou d'un génial Architecte, nos descendants et nous-mêmes avons au contraire profité de cette révolution pour nous libérer, d'abord de manière imaginaire puis de manière effective, des chaînes qui nous retenaient à notre bonne vieille Terre.

Après Cyrano de Bergerac ou Jules Verne, ce sont Konstantin Tsiolkovsky, Robert Goddard, Hermann Oberth ou Robert Esnault-Pelterie qui se sont mis au travail pour poser les fondements de l'aéronautique et permettre, au milieu du XXe siècle, d'entamer l'exploration effective de l'espace. Grâce à eux et à tous ceux qui les ont suivis, nous sommes devenus, effectivement ou par procuration, des chevaucheurs des nuées, des enfants des étoiles.

« *That's one small step for man, one giant leap for mankind.* » Le mot de Neil Armstrong, prononcé le 21 juillet 1969, ne résume que partiellement la situation astronautique actuelle, sans doute à cause de la personnalité de son auteur qui, après son exploit, n'a pas cessé de cultiver la discrétion et la réserve et se contente de parler d'un « *petit pas* ». En fait, l'espace continue à offrir à de nombreux humains l'occasion d'accomplir des pas de géant, à l'aune de leur propre histoire et de leur propre personnalité ; pensons seulement au témoignage récent et lumineux de Thomas Pesquet. À l'inverse et dans le même temps, le « pas sur la Lune » accompli il y a cinquante ans a marqué le point le plus extrême de l'exploration humaine ; depuis la fin du programme Apollo, c'est à l'ombre de la Terre que

les astronautes apprennent à vivre dans l'espace pour se préparer aux futures expéditions interplanétaires.

Ceux qui craignaient que l'exploration spatiale ne détache définitivement l'humanité de sa planète-mère ont pu ainsi se rassurer : en franchissant la barrière atmosphérique et, partiellement, gravitationnelle, les humains n'ont pas définitivement dénoué les liens qui les unissent à la Terre ; ils les ont plutôt renoués. Le pas de côté offert par les vols spatiaux, habités ou non, a effectivement et efficacement contribué à l'émergence d'une appréhension globale de notre planète, de nos environnements, de notre espèce et de leur futur commun. C'est là une conséquence de la révolution copernicienne et de ses suites astronautiques qui n'avait guère été envisagée...

PATRIMOINE COMMUN

Au mot d'Armstrong répond donc désormais celui de René Dubos, largement repris par ceux qui s'inquiètent de l'avenir de notre planète : « *Penser globalement, agir localement* ». Mais les sentences bien frappées ne suffisent pas à résoudre les difficultés et à franchir les obstacles « *to make our planet great (and green) again* ». Et les pas à accomplir pour sortir notre Terre des ornières écologiques et des crises environnementales paraissent par moments plus grands, plus difficiles à faire que ceux réalisés il y a un demi-siècle pour parvenir à poser un pied sur la Lune. Pour autant et même s'il n'est pas question pour le domaine spatial de prétendre donner des leçons au reste du monde et des Terriens, il n'en demeure pas moins possible de tirer quelques enseignements de son histoire et de ses pratiques.

Le premier pourrait être l'existence d'une volonté et d'une décision de reconnaître les principes de libre accès à l'espace et de sa non-appropriation. Je ne m'intéresserai ici qu'au second, car il a conduit à user, dans les textes législatifs, des notions de bien commun et de patrimoine commun. Ces notions sont connues des juristes terrestres ; ils les ont utilisées pour élaborer le droit maritime ou encore les accords internationaux sur l'Antarctique. Appliquées à l'espace, elles suscitent souvent des réactions d'incompréhension ou même de critique, d'ailleurs parfaitement compréhensibles : « *De quel droit l'humanité ose-t-elle s'approprier l'espace ? Cet aspect du droit spatial n'est-il pas une nouvelle preuve de l'arrogance humaine ?* » Cette interprétation est possible, mais je lui préfère celle qui souligne la responsabilité qui incombe à l'humanité exploratrice et, demain peut-être, exploitante (exploiteuse ?) de l'espace. Déclarer l'espace, les corps célestes patrimoine commun de l'humanité, c'est reconnaître, accepter la charge de gérer ce que nous découvrons, ce dont nous profitons comme des gestionnaires raisonnables.

Aujourd'hui, cette responsabilité concerne aussi bien les orbites autour de la Terre (la circulation des satellites, l'attribution des fréquences, l'usage des images issues de la télédétection, etc.) que l'exploration du système solaire (la stérilisation des sondes et, plus largement, la protection planétaire). Demain, il faudra organiser, gouverner l'exploitation des ressources de l'espace, en particulier minières ; c'est là un sujet qui suscite d'ores et déjà de vives discussions au sein de la communauté des juristes spatiaux, surtout depuis que les États-Unis et le Grand-Duché du Luxembourg soutiennent officiellement les entreprises du NewSpace qui entendent « défricher » ce domaine d'activités spatiales... Qu'en sera-t-il demain du principe de non-appropriation, de la notion de patrimoine commun ? Personne ne saurait raisonnablement le dire. Il n'en reste pas moins que le droit spatial, dans son état actuel, constitue une référence qui ne saurait être ignorée, quand bien elle serait demain bafouée. L'espace n'est pas hors-la-loi.

Ne devrions-nous pas sérieusement réfléchir à appliquer cette idée de patrimoine commun à notre propre planète ? N'avons-nous pas construit, acquis une singulière responsabilité à son égard ? Il n'est pas question d'ignorer les revendications nationales mais plutôt de nous préparer à une possible évolution, révolution, provoquée par la dégradation des conditions terrestres (du moins, pour l'espèce humaine), qui contraigne à dépasser les actuelles revendications de propriété personnelle ou collective...

L'ESPACE AU FUTUR

Le second enseignement qui pourrait être tiré de l'expérience spatiale mi-séculaire concerne l'appréhension du temps qui vient. J'utilise à dessein cette singulière expression pour distinguer l'avenir et le futur. Je trouve en effet pertinent de définir l'avenir comme ce qui nous arrivera, ce que nous aurons à subir, et le futur comme ce que nous aurons préparé, réalisé. À y réfléchir, l'espace ne nous offre-t-il pas l'un et l'autre ?

Car l'espace, les dictionnaires nous le rappellent, est à la fois un territoire et un champ d'activités. Un territoire d'une part, qui reste en grande partie inconnu et donc à découvrir, un territoire qui nous réserve encore bien des surprises, bonnes ou mauvaises. Un champ d'activités d'autre part, dont la plupart nous sont aujourd'hui sans doute inconnues, mais qu'il nous reviendra à nous seuls d'entreprendre ou non : poursuivre l'exploration humaine, exploiter les ressources spatiales, coloniser la Lune ou Mars. Bref, l'espace de demain sera, comme il l'est d'ailleurs depuis soixante ans, un mélange d'avenir et de futur, de révolution et de responsabilité.

Dès lors, nous ne pouvons pas nous contenter de faire confiance à nos seules capacités technologiques, aussi impressionnantes soient-elles. Le « solutionnisme » (autrement dit, la conviction que nous saurons toujours inventer un moyen technique pour résoudre les problèmes causés par la technique) n'est pas une... solution ! Sans négliger d'entretenir et de développer la recherche scientifique et l'innovation technique, l'espace doit être également un lieu et une raison pour développer une responsabilité à l'égard de notre propre humanité et de notre environnement, aussi bien « atmosphérique » qu'« extra-atmosphérique ». Une responsabilité qui ne se contente pas de répondre aux surprises de l'avenir, mais qui s'inquiète aussi de poser les jalons du futur. ■

Derniers livres parus :

Oublier la Terre ? La conquête spatiale 2.0, Le Pommier, 2018.

La Lune m'a dit. Cinquante ans après le premier homme sur la Lune, Cerf, 2019.

ACTUALITÉS

FEDERATION – OPEN SPACE MAKERS

LE PREMIER FORUM FEDERATION, ÉVÉNEMENT NATIONAL DE L'ASSOCIATION 'OPEN SPACE MAKERS', S'EST TENU LES 4 ET 5 OCTOBRE DERNIERS À PARIS AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

Par **Damien Hartmann**, président d'Open Space Makers
damien.hartmann@gmail.com - +336 89 67 43 92 - Twitter : @hart_dam



FEDERATION
Open Space Makers

LA CONVENTION DE PARTENARIAT ENTRE OPEN SPACE MAKERS ET LE CNES

En préambule à l'ouverture de ce Forum, le président du CNES Jean-Yves Le Gall et Damien Hartmann, président d'Open Space Makers ont signé vendredi 4 octobre 2019 une Convention de partenariat dans le cadre de l'Initiative FEDERATION.



À gauche le président du CNES Jean-Yves Le Gall et à droite le président d'Open Space Makers Damien Hartmann

UN BREF RAPPEL

En juillet 2017 le CNES lançait FEDERATION, aboutissement d'une réflexion sur l'ouverture du secteur spatial au plus grand nombre d'utilisateurs potentiels, s'inspirant des mouvements 'Makers' et de l'économie collaborative. L'Association Fédération vise à mettre en place et animer un écosystème spatial en fédérant différentes composantes de la société civile, permettant ainsi le développement d'open hardware' au niveau national et l'émergence de nouveaux concepts spatiaux susceptibles d'être développés de façon collaborative. Une dynamique positive autour de FEDERATION s'est rapidement manifestée dans la société civile, conduisant à la constitution en octobre 2017 de l'association à but non lucratif Open Space Makers [1] [2] [3] [4] [5] [6].

Aujourd'hui Open Space Makers met en œuvre FEDERATION à travers :

- Un réseau des tiers-lieux ayant la capacité de prototyper de manière distribuée ;
- Une plateforme web permettant l'incubation des idées, la gestion de projets, la conception et l'apprentissage collaboratif et ouvert ;
- Un cadre de contribution (la Charte Fédération) basé sur les principes de l'Open Source.

LA CONVENTION CNES-OPEN SPACE MAKERS

La convention CNES-Open Space Makers fixe un cadre pour mener une collaboration autour de trois axes :

1. Soutenir le développement et la réalisation de projets « Fédération » existants ou nouveaux ;
2. Créer, partager et diffuser des connaissances et des savoir-faire liés au spatial entre le milieu « amateur » et le personnel du CNES ;
3. Mener des actions conjointes visant à faire émerger de nouveaux concepts spatiaux susceptibles d'être développés de façon collaborative.

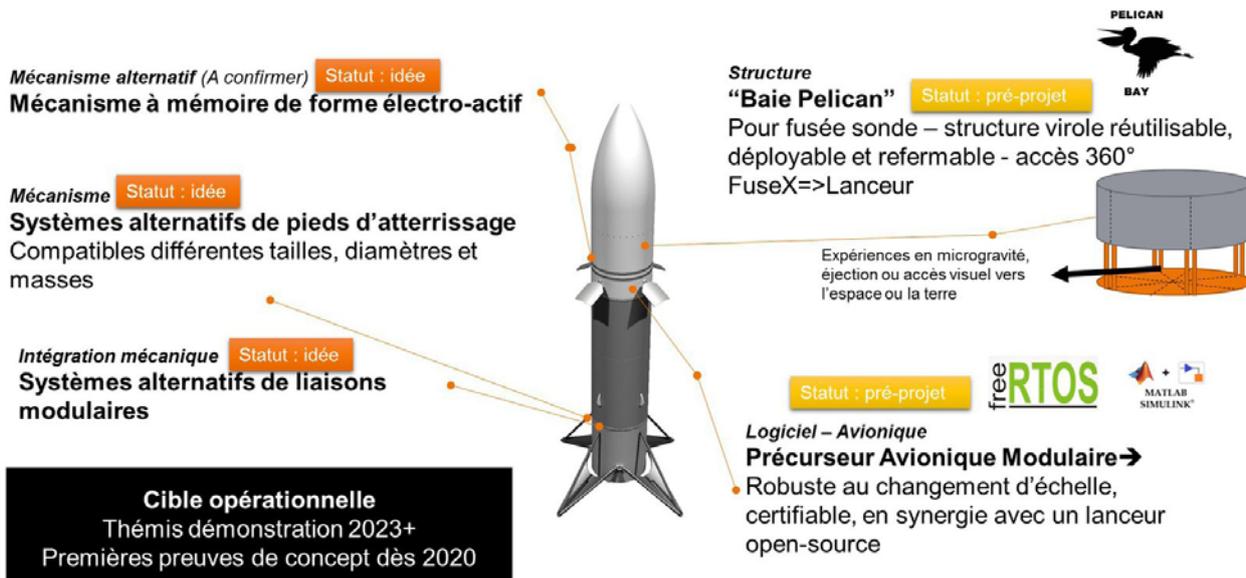
Cette Convention témoigne de la volonté du CNES et d'Open Space Makers de se projeter dans un avenir de partage et d'ouverture, et de leur capacité à réinventer leurs modes de travail.

LE DÉROULEMENT DU FORUM FEDERATION

Faisant suite à la signature de la Convention CNES, le Forum s'est déroulé au cours des deux journées du 4 et du 5 octobre, rassemblant 70 participants, avec au programme la revue des projets en cours et le lancement du « Jardin Fédération ». Ce « Jardin Fédération » est un lieu partagé de réflexion, d'inclusion et d'ouverture, visant à croiser les visions sur des sujets qui vont au-delà du spatial et de la technologie. C'est ainsi que le thème du 4 octobre après-midi était : Quelles organisations résilientes, collaboratives et responsables pour faire face aux grands enjeux de demain ?

Le matin du 5 octobre était dédié aux membres actifs de Open Space Makers, centré sur des ateliers organisés par « cercles » structurant l'action de l'organisation, à savoir : plateforme, pédagogie, projets et communication.

ACTUALITÉS FEDERATION – OPEN SPACE MAKERS



Le 5 octobre après-midi était consacré à un « mini-Space-Up » essentiellement centrée sur les projets et des idées de projets Fédération : Marsproof , Ad Astra, Système de séparation d'étages, Miniloop, ... Ces projets ont donné lieu à des présentations plénières, après quoi des sessions spécialisées ont permis de discuter plus en détails certains aspects et d'élargir les échanges.

Le format très ouvert de Space-up a été un catalyseur de créativité, avec des participants qui ont montré une incroyable énergie.

LA PARTICIPATION D'ARIANENWORKS

Pendant le Forum Fédération, ArianeWorks a annoncé un partenariat avec Open Space Makers en utilisant le cadre de la Convention CNES - Open Space Makers

La Société ArianeWorks propose des sujets de sous-systèmes lanceurs compatibles avec les besoins de 'Themis' ; elle est ouverte à de nouvelles idées et de nouvelles propositions de projets compatibles avec les besoins de Themis. L'équipe étudiera la pertinence des propositions au regard des besoins de la démonstration et aura la faculté de les intégrer dans le cadre de « Themis-Open ».

EN CONCLUSION

La signature de la Convention CNES, l'excellent déroulement du Forum et l'annonce de la participation d'ArianeWorks constituent à l'évidence des signes extrêmement encourageants annonciateurs d'une montée en puissance de FEDERATION dans les mois à venir.

RÉFÉRENCES

- [1] Lettre 3AF N° 26 – Juillet-Août 2017 – Numéro Spécial FEDERATION Open Space Makers
- [2] Lettre 3AF N° 29 – Janvier-Février 2018 – Point sur l'avancement de l'Initiative FEDERATION – Par Damien Hartmann - page 39
- [3] Lettre 3AF N° 38 – Numéro Spécial Espace – FEDERATION Open Space Makers : ouvrir le monde de l'infrastructure spatiale au plus grand nombre – Par Damien Hartmann – pages 54 à 58
- [4] Statuts Associatifs – FEDERATION Open Space makers
- [5] FEDERATION Open Space Makers – CHARTE Edition 1/Révision 0 – 5 avril 2017
- [6] Jacques Blamont – RESEAUX Le pari de l'intelligence collective – CNRS Editions Paris 2018 – 267 pages – ISBN : 978-2-271-12235-3 – www.cnrseditions.fr



Réseaux ! Le pari de l'intelligence collective

ACTUALITÉS

LES PRIX 2019 DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

par Julie Amoyel et Bruno Chanetz, ONERA

« Il s'agit pour l'ONERA, d'une moisson de prix décernés par l'Académie des sciences, sans précédent. C'est la reconnaissance de notre excellence scientifique et de la très haute qualité de nos ingénieurs mais aussi que l'approche pluridisciplinaire de l'ONERA est une force » a commenté Bruno Sainjon, Président-directeur général de l'ONERA.



Crédit photo Simon Cassanas

De gauche à droite, Yves André (CNES), Gilles Métris (Observatoire de la Côte d'Azur, Manuel Rodrigues (ONERA), Françoise Touboul représentant Pierre Touboul et Patrick Flandrin, vice-président de l'Académie des sciences.

Prix Servant pour Pierre Touboul et Manuel Rodrigues (ONERA), Gilles Metris (UMR Géoazur) et Yves André (CNES)

Le prix Servant est décerné tous les deux ans alternativement dans le domaine des sciences mathématiques et des sciences physiques. Cette récompense créée en 1952 est devenue grand prix thématique en 2001.

Ce prix prestigieux honore Pierre Touboul et Manuel Rodrigues, respectivement principal investigateur et co-investigateur scientifique de la mission Microscope, réalisée à bord du satellite de la mission MICROSCOPE, premier micro-satellite du CNES dédié à la physique fondamentale.

Il distingue également Gilles Métris, astronome à l'UMR Géoazur (UNS-CNRS-OCA-IRD), co-principal investiga-

teur de la mission et responsable des développements des algorithmes pour l'analyse des données, ainsi que Yves André, chef de projet Microscope au CNES.

Sélectionné par le CNES en 1999, le projet a été un immense défi, nécessitant de faire appel aux limites de performances des technologies pour atteindre la précision requise. Au-delà de l'instrument, l'ONERA en sa qualité de responsable scientifique, a développé le centre de mission scientifique ainsi que le service de distribution de données prévu à l'ouverture dès la publication finale des résultats.

Voir l'article sur la mission MICROSCOPE par Manuel Rodrigues dans la Lettre 3AF n°29 :

<https://www.3af.fr/sites/default/files/epreuve-lettre29-preview.pdf>



Crédit photo Simon Cassanas

Prix Lazare Carnot pour Laurent Mugnier (ONERA)

Ce prix récompense depuis 1992 des travaux de recherche fondamentale ayant des perspectives d'applications à la fois civiles et militaires. C'est le cas de l'optique adaptative et des traitements associés, une spécialité que l'ONERA a développée et appliquée dans de nombreux domaines.

Laurent Mugnier, maître de recherche au département d'Optique et techniques associées de l'ONERA, a développé des outils mathématiques et algorithmiques fondés sur une analyse physique et remarquablement performants pour l'analyse et le traitement des données, qu'il s'agisse d'images de satellites artificiels terrestres ou de mesures interférométriques d'objets astronomiques, ou de l'observation de la Terre depuis l'espace :

<https://www.youtube.com/watch?v=IEFqeOZ4mOY>

Ses puissantes méthodes de déconvolution d'images permettent l'exploitation optimale de coûteux instruments, tel le Very Large Telescope européen.

Elles se transposent et s'appliquent à l'imagerie rétinienne au service de nombreux patients, ou à la propagation de faisceaux de lasers de puissance dans l'atmosphère. Poussant à l'extrême la résolution des instruments, ses résultats contribuent à l'activité de la Défense comme à des explorations majeures : exo planète PDS70b et trou noir massif de notre Galaxie.

Voir compléments dans l'article de Thierry Fusco sur l'Optique adaptative dans la Lettre 3AF n°33 :

<https://www.3af.fr/sites/default/files/lettre-3af-33.pdf>



Crédit photo Simon Cassanas

Prix Paul Doistau-Émile Bluetet pour Denis Sipp (ONERA)

Le prix Paul Doistau-Émile Bluetet est un prix biennal décerné depuis 1954 dans le domaine des mathématiques ou dans le domaine de l'astronomie et la physique du globe.

Denis Sipp est lauréat pour ses recherches fondamentales sur les instabilités hydrodynamiques et leur contrôle qui ont un impact profond sur notre compréhension de la transition vers la turbulence. Son domaine d'expertise est la modélisation et le contrôle des fluctuations aérodynamiques pour diverses applications :

- la maîtrise de la transition dans les couches limites pour la conception des futurs avions
- les instabilités de tremblement sur un profil d'aile qui limitent le domaine de vol d'un avion
- le pompage d'une entrée d'air ou de turbomachine.

Denis Sipp a surtout développé une approche linéarisée pour la modélisation et le contrôle des fluctuations: une structure cohérente dans un écoulement turbulent est un mode propre de l'opérateur de Navier-Stokes linéarisé et son contrôle (suppression du phénomène) passe par l'analyse du mode propre adjoint. ■

L'ASCENSEUR SPATIAL

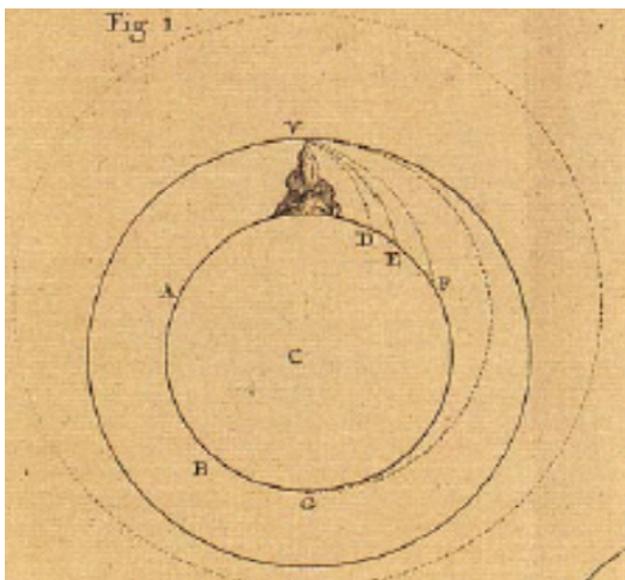
par Christophe Bonnal, CNES, direction des Lanceurs, membre émérite 3AF

Le 14 mai 2019, Christophe Bonnal donnait une conférence sur l'ascenseur spatial à la mairie du XVe arrondissement de Paris dans le cadre des activités organisées par le groupe 3AF IDF. Cet article permettra de mieux conserver le souvenir de cette conférence fort appréciée.

PETITE HISTOIRE D'UNE IDÉE QUI MONTE

Pour devenir brillante, une bonne idée se doit d'abord d'être simple...

Le but recherché pour un satellite est de gagner de l'altitude par rapport à la surface de la Terre, beaucoup d'altitude, et de s'y maintenir. On veut donc fondamentalement monter, se dégager de l'atmosphère, atteindre les cieux et y couler une vie tranquille d'observation, de communication et de science ; foin de toutes ces fusées et gros engins complexes, chers et énergétivores, il suffirait en théorie de grimper sur une structure ad hoc jusqu'à la bonne altitude.



Dessin de Newton, 1687

Le grand Newton l'avait compris : dans ses dessins de 1687 présentant le principe des satellites, il tirait déjà directement son objet sidéral à l'horizontale depuis une hypothétique montagne de quelques 200 km d'altitude avec une vitesse suffisante pour que le point de chute dépasse les antipodes (Principia Mathematica). De tels promontoires naturels n'existant malheureusement pas sur notre planète, il faut donc les construire.

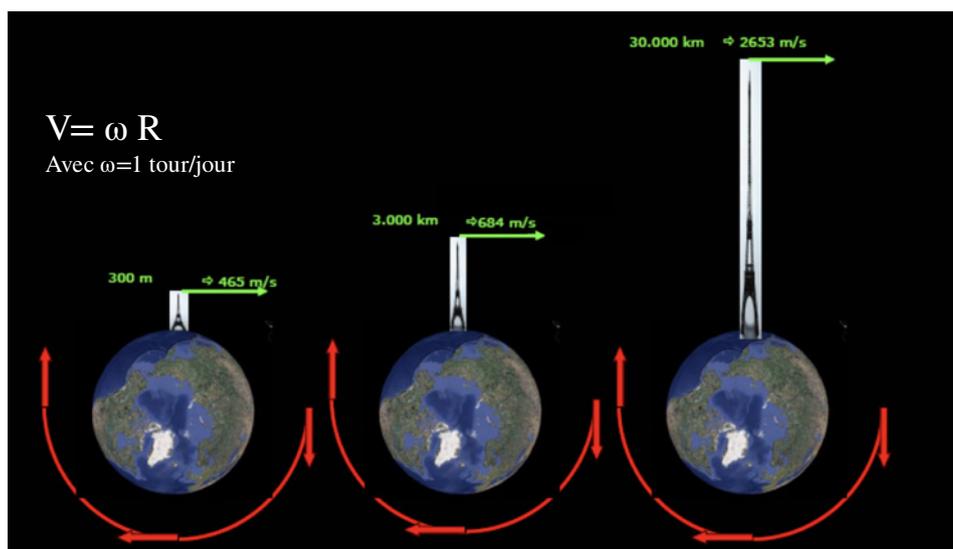
Les promoteurs de l'Ascenseur Spatial ne manquent généralement pas de mentionner la première tentative concrète publiée, celle de la tour de Babel en 2100 avant JC. Littéralement Bab-ilani, la Porte-des-dieux, c'était une ziggourat, temple-tour à étage, censée permettre aux Babyloniens d'atteindre le domaine d'Anou, leur dieu

suprême, qui vivait au plus haut des cieux. L'entreprise échoua pour les raisons qu'on sait ; la tour n'aurait de toute façon pas pu culminer bien haut, la technique de construction utilisée alors, à base de briques moulées cuites au four avec du bitume comme mortier, ne présentant pas les caractéristiques mécaniques suffisantes pour dépasser quelques centaines de mètres d'altitude (quand même...).

L'idée se perdit alors pendant plusieurs siècles jusqu'à la visite de Constantin Tsiolkovski (oui, celui qui a établi l'équation de la propulsion fusée) à Paris en 1895 où il eut une véritable révélation en voyant la Tour Eiffel. Brillant ingénieur, il comprit à la fois la révolution apportée par la construction métallique (la Tour était de fait une démonstration de cette nouvelle technologie), et la répartition des charges mécaniques à travers un treillis, le poids d'un élément étant supporté par plusieurs autres éléments en dessous suivant la forme caractéristique de la Tour Eiffel, s'évasant vers le bas suivant une courbe logarithmique. Il exhuma l'idée d'une tour, porte vers les cieux, et publia à la suite de cette visite un ouvrage fondamental, Rêves de la Terre et du Ciel, « expérience de pensée » suivant son expression, dans lequel il introduisit plusieurs des concepts fondamentaux de l'astronautique. Il imagina une tour gigantesque, placée sur l'équateur, le long de laquelle un « astronaute » monterait progressivement. Au fur et à mesure de l'ascension, les deux forces s'exerçant sur l'explorateur varient :

- L'attraction terrestre, d'abord, diminue comme l'inverse du carré de la distance au centre de la Terre : en doublant cette distance, cette force est divisée par quatre, en décuplant cette distance, par 100 et ainsi de suite ; cette force d'attraction est bien sûr dirigée vers le centre de la Terre ;
- La force centrifuge, ensuite, due à la rotation de la Terre ; cet effet, bien connu des pilotes roulant à vive allure dans un virage par exemple, augmente lui avec la distance au centre de la Terre pour une vitesse angulaire donnée : en doublant cette distance, cette force est doublée, en décuplant cette distance, elle est également décuplée ; cet effet centrifuge, comme son nom l'indique, tend à éloigner le sujet de la Terre.

Lors de la montée, le poids apparent du voyageur, somme de l'attraction terrestre et de la force centrifuge opposée, tend ainsi à diminuer. Arrive alors un lieu dans la montée où ces deux forces se compensent exactement. Notre sujet n'est plus soumis à aucune force et se trouve alors en impesanteur ; il conserve sa vitesse de rotation autour de



Effet de la rotation de la terre et de l'altitude sur la vitesse

la Terre et tourne librement en restant toujours à la même altitude, qualifiée d'altitude Géostationnaire, et toujours à la verticale du même lieu. Tsiolkovski calcula l'altitude géostationnaire pour la Terre, environ 36.000 km, ainsi que pour les cinq autres planètes identifiées à cette époque et pour le Soleil. Il expliqua également que si notre voyageur continue à grimper le long de la tour, la force centrifuge deviendra prépondérante, tendant à l'envoyer dans l'espace. Il calcula enfin l'altitude nécessaire pour être spontanément envoyé vers la Lune et vers Mars. Il n'eut cependant pas l'idée d'utiliser cette singularité pour des satellites ; le mérite de cette invention revient à Arthur C. Clarke qui proposa en 1945 l'utilisation de l'orbite géostationnaire, depuis souvent appelée orbite de Clarke, pour les satellites de communication.

La combinaison de cette vision théorique et des techniques modernes de construction fut ensuite proposée en 1960 par un jeune ingénieur de Leningrad, Youri Artsutanov, dans un article du supplément dominical du Komsomolskaya Pravda qui resta totalement méconnu jusqu'en 1967. Il imagina une gigantesque tour, toujours sur l'équateur, s'élevant au-delà de l'altitude géostationnaire, construite sur le même principe que la Tour Eiffel, sorte de cône très évasé vers le bas pour répartir le poids formidable de la tour ; il l'affubla du joli nom de « Funiculaire du Paradis ».

Artsutanov savait bien calculer, et comprit malheureusement très vite qu'une telle tour était mécaniquement impossible, même avec le meilleur acier connu à l'époque : la difficulté vient en effet du fait que les matériaux travaillent en compression, chaque élément s'appuyant sur ceux du dessous ; or les matériaux n'ont qu'une faible résistance en compression, environ dix fois moindre qu'en traction. Il proposa alors de construire la tour à l'envers, la partie évasée à l'altitude géostationnaire et la pointe en bas, afin de faire travailler les matériaux en traction, en

étendant la tour bien au-delà de l'altitude géostationnaire afin de garder le centre de gravité global au bon endroit.

L'idée était presque parfaite, mais se heurta à l'écueil des dimensions générales de l'ouvrage : même avec le meilleur acier connu à l'époque l'évasement nécessaire à la bonne tenue structurale de la tour relevait tout simplement de la science-fiction. Pour un simple câble d'un diamètre égal à celui d'un cheveu à la surface de la terre, capable de soutenir un demi kilo de sucre sur Terre, il aurait fallu un diamètre en géostationnaire supérieur à celui de la Terre... Ce n'était pas gagné, et l'idée de l'Ascenseur Spatial retourna dans les cartons pour quelques temps.

Elle ressortit en 1967 sous l'initiative d'un groupe d'océanographes américains, menés par John Isaacs du Scripps Institution of Oceanography à La Jolla en Californie. Ces chercheurs, qui tentaient sans doute de diversifier leurs activités, étaient fort familiers des opérations utilisant de très longs câbles pour sonder les fosses marines ; dans leur publication parue dans la revue Science, ils reconnaissaient cependant qu'il fallait parler de câbles 3.000 fois plus longs que ceux qu'ils avaient utilisés pour sonder la fosse des Mariannes (11.000 m).

Leur contribution fut essentielle car ils proposèrent le schéma de déploiement de l'ascenseur encore en vigueur aujourd'hui : à partir d'un gros satellite en orbite géostationnaire, un câble extrêmement fin, donc léger, serait déployé simultanément par-dessus et par-dessous afin de conserver inchangé le centre de gravité ; de plus, dès que ce câble arriverait à la surface de la Terre, il serait accroché à son ancre et servirait à monter la première « cabine » avec un second câble pour renforcer le premier. A force d'allers et retours, le câble final serait enfin suffisamment robuste pour être utilisé opérationnellement pour monter des charges utiles.

La question primordiale du matériau à utiliser était abordée élégamment bien que brièvement avec la proposition d'utiliser du quartz, du graphite ou du diamant : leur premier câble, moitié plus fin qu'un cheveu, capable de supporter une masse de 3,5 kg sur Terre, ne pesait ainsi qu'une demi tonne. Le concept péchait cependant sur deux aspects : le premier micro câble était bien trop fin, et aurait été coupé instantanément par un impact de micrométéorites, microscopiques poussières tombant sur Terre à des vitesses de l'ordre de 70 km par seconde ; de plus, mais comme le fait remarquer Arthur Clarke, le cours du diamant étant ce qu'il est, une demi tonne représente un investissement coquet... pour le premier câble. Nouvelle sortie de scène de l'Ascenseur Spatial pour quelques années.

L'entrée dans l'ère moderne de la tour orbitale, comme on l'appelait alors, est incontestablement l'œuvre de Jérôme Pearson, ingénieur américain travaillant alors pour le laboratoire de dynamique du vol de l'US Air Force dans l'Ohio, collègue et ami de l'Académie Internationale d'Astronautique IAA. Il fit paraître en 1974, dans la prestigieuse revue de l'IAA *Acta Astronautica* (Vol 2, pp 785-799, 1975), un examen technique exhaustif du sujet intitulé « un lanceur de satellite utilisant l'énergie rotationnelle de la Terre ». Certes, son idée eut du mal à être acceptée et il dut batailler cinq ans avant de faire accepter son papier, mais grâce à son initiative le concept put être très largement diffusé, discuté, critiqué, conspué et in fine reconnu.

Dans sa publication, Pearson explicite toutes les équations gouvernant l'Ascenseur Spatial et en établit la forme théorique précise, fonction des matériaux considérés. Il établit que la hauteur totale de la tour doit être de 144.000 km, soit près de 40% de la distance Terre-Lune, et montre qu'on peut alors, en partant de l'extrémité du câble, atteindre n'importe quel point du système solaire, voire s'en échapper totalement. Il calcule les premiers modes oscillatoires du câble, ses fréquences propres de vibration un peu à l'instar d'une corde de piano, et en déduit les vitesses théoriques à adopter pour les cabines desservant l'ascenseur. Il aborde également la tenue du câble soumis aux conditions météorologiques dans les zones atmosphériques et décrit ce qui se passerait en cas de rupture du câble. Il identifie enfin les deux zones géographiques idéales pour la construction du câble, zones de stabilité relative vis-à-vis des perturbations orbitales générées par la Lune et le Soleil : les deux portes des cieux devraient se situer sur l'équateur au droit de Sri Lanka, ou dans le Pacifique, à l'Ouest des Galápagos. Malheureusement pour lui, il lui manque encore le matériau miracle qui permettrait de rester dans des dimensions raisonnables, et Pearson conclut son article en indiquant qu'il faudrait quand même 24.000 vols d'une hypothétique navette spatiale 30 fois plus grosse que le Space Shuttle

pour achever la construction de sa tour.



Premier concept d'ascenseur spatial par Jerome Pearson

Le dernier acteur dans la saga historique de l'Ascenseur Spatial est le romancier Arthur C. Clarke. Ayant pris connaissance de l'article de Pearson, il entretint une correspondance avec lui durant de nombreuses années en préparation de son roman « les fontaines du Paradis » paru en 1978. Ce livre de science-fiction, passionnant, raconte l'histoire de la construction de la Tour des Etoiles sur l'île de Taprobane, en fait Sri Lanka. L'ingénieur en charge du projet, Vannevar Morgan, célèbre notamment pour son pont suspendu au-dessus du détroit de Gibraltar, dispose d'un matériau révolutionnaire, « fil quasi invisible en cristal de diamant continu pseudo-mono-dimensionnel » ; on y est presque... Clarke aborde dans son roman tous les problèmes associés à une telle entreprise, depuis l'expropriation des moines propriétaires des lieux jusqu'aux difficultés de financement, pour terminer par... [Non au spoil 😊]. Il est bon de noter qu'Arthur Clarke s'est installé depuis au Sri Lanka, au point le plus proche de ce qu'il appelle « la porte des étoiles », jusqu'à sa mort en 2008.

LA RÉVOLUTION DES NANOTUBES

Un matériau nouveau, découvert dans les années 1990, a complètement changé la donne en apportant une solution potentielle aux contraintes mécaniques gigantesques rencontrées par l'Ascenseur Spatial : le nanotube de Carbone.

L'élément précurseur de cette découverte est une molécule en forme de ballon de football répondant au joli nom de Buckminsterfullerène ; c'est une molécule sphérique comportant 60 atomes de Carbone réparti suivant le même motif de pentagones et d'hexagones que le ballon de foot standard ; elle a d'ailleurs été rapidement rebaptisée Footballène. Synthétisée pour la première fois en 1985 par Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley de l'Université Rice aux USA (ce qui leur a valu le prix Nobel en 1996), cette molécule est la première de la série des fullerènes, composés tridimensionnels, genre de

molécules-cages, de tailles variées à base de pentagones et d'hexagones de Carbone (on peut également en imaginer à base d'autres atomes). Leur nom provient d'un hommage rendu à Richard Buckminster Fuller, génial touche-à-tout américain mort en 1983, inventeur notamment des radômes en forme de ballons de foot (dômes géodésiques) en 1949, d'où le nom ; les américains appellent d'ailleurs souvent Buckyballs les fullerènes, Buckytubes les nanotubes et même Buckypaper le graphène, nappe plane composée de structures du même type d'atomes de Carbone.

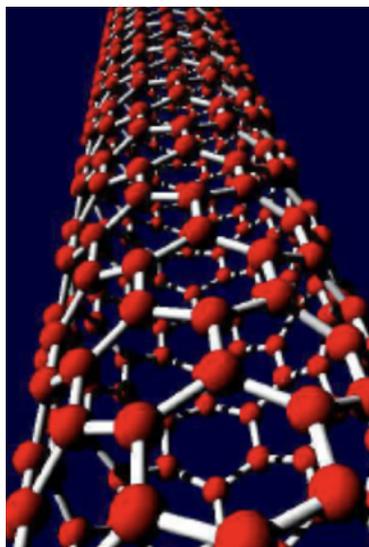
Le Japonais Sumio Iijima a le premier réussi en 1991 à produire des tubes de carbone dérivés de ces fullerènes, les nanotubes. Ces tubes microscopiques, d'un diamètre de quelques millièmes de millimètre seulement, soit 50.000 fois plus fins qu'un cheveu, ont des parois très régulières présentant le même motif à base d'hexagones de Carbone, répété à l'infini. La paternité de cette découverte est souvent objet de polémiques, car on s'est rendu compte a posteriori que de nombreux auteurs avaient mentionné la présence de tels composés, notamment dans des fours à arc électrique. On a même montré depuis que la simple combustion d'un bougie produit des quantités infinitésimales de fullerènes, et certains chercheurs en ont détecté la présence en 1996 dans le cratère d'impact de Sudbury, au Canada, démontrant par ailleurs que ces fullerènes provenaient vraisemblablement de la météorite entrée en collision avec notre planète.

Ces fibres ont des propriétés exceptionnelles ! Elles sont 30 à 60 fois plus résistantes que le meilleur acier (certains théoriciens pensant même pouvoir monter à plus de 100) tout en étant 6 fois moins denses ; le critère communément utilisé en ingénierie étant le rapport entre la résistance à la traction et la densité, (quelle est la résistance pour une masse donnée), on obtient ainsi un gain théorique tout simplement phénoménal ! Un fil d'acier pourrait en théorie être remplacé par un fil en nanotube 300 fois plus léger : un fil en nanotube 2 fois plus gros qu'un cheveu peut supporter un homme.

Les autres propriétés physiques des nanotubes sont tout aussi surprenantes : leur module d'élasticité, c'est-à-dire leur propension à s'étirer sous l'effet d'une traction, est 5 à 10 fois plus élevé que celui de l'acier ; ce sont d'excellents conducteurs électriques, présentant des densités maximales de courant 1.000 fois meilleures que le Cuivre ou l'Argent, mais peuvent être des semi-conducteurs si on choisit bien leur structure cristalline. Ils conduisent particulièrement bien la chaleur le long du tube, tout en étant de très bons isolants latéralement et ont une très forte propension au stockage d'Hydrogène avec toutes les applications potentielles que l'on imagine... N'en jetons plus, le Graal des ingénieurs est sans doute ce matériau découvert il y a seulement 28 ans, véritablement révolutionnaire et

certainement promis à un avenir radieux. La NASA ne s'y est d'ailleurs pas trompée, proposant dès 1997 une série d'axes de progrès architecturée autour des nanotubes en préparation d'une future génération avancée de lanceurs réutilisables ; c'est également le matériau de référence pour le concept Ariane Ultimate étudié par le CNES (Espace & Exploration N°49 Janvier 2019).

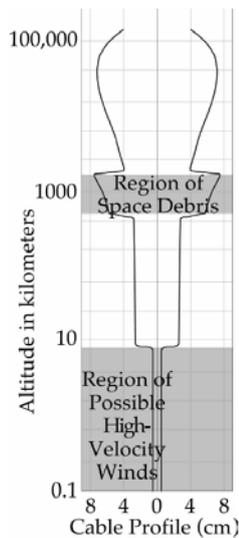
Cette promesse d'avenir n'est naturellement pas passée inaperçue : on ne compte plus les start-ups, voire les grosses sociétés, qui investissent massivement sur la production de ces nanotubes et des composites associés. Ils sont déjà présents dans certaines raquettes de tennis et de squash, dans le cadre des vélos les plus performants, dans la coque des kayaks... Marché phénoménal en vue, avec tout ce que cela comporte comme prise de brevets, confidentialité, espionnage industriel...



Nanotube de carbone

Il convient toutefois de relativiser fortement l'état actuel du développement de ces nanotubes ! En 2013, d'après la littérature ouverte, le record de longueur pour une telle fibre était de 55 cm et son coût de production restait en 2009 de l'ordre de 250 € le kilogramme ; il reste quelques progrès à faire avant de produire un câble de plus de 100.000 km à un coût raisonnable, même si ces chiffres ont certainement été fortement améliorés depuis ! La synthèse de ces fibres est extrêmement complexe et de très nombreux laboratoires travaillent d'arrache-pied sur le sujet : en France, par exemple, le CNRS travaille sur une méthode à base d'arc électrique et de vaporisation par laser du Carbone ; le CEA a développé des méthodes de dépôt en phase vapeur et de pyrolyse d'aérosols, produisant des espèces de paillassons de très bonne qualité ; on peut produire des fullerènes au foyer d'un four solaire, comme celui opéré par le CNRS à Odeillo, ou utiliser divers procédés électrochimiques. (Le lecteur curieux pourra consulter la thèse de Philippe Roux-Lévy,

très complète, chargeable sous <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02018707/document>



Variation de l'épaisseur du câble avec l'altitude.
crédit NASA - Edwards

Sans entrer plus dans les détails de type de nanotubes, pureté, qualité cristallographique, inclusion dans une matrice, alignement des fibres, etc., on peut retenir que c'est une technologie en devenir dont l'application à l'échelle industrielle à moyen terme semble très prometteuse : il faut laisser le temps au temps en matière de recherche (l'unité de temps étant ici le Dollar, l'Euro, le Yen ou le Yuan...).

L'ASCENSEUR SPATIAL : VISITE GUIDÉE

Pour revenir à notre projet d'Ascenseur, la promesse de pouvoir disposer un jour d'une fibre suffisamment solide et légère pour réaliser le câble a naturellement donné une seconde jeunesse au concept. La NASA s'en est alors mêlée, engageant une étude de six mois avec un financement très significatif, via le NIAC (NASA Institute for Advanced Concepts), son bureau spécialisé dans les concepts très avancés.

L'étude menée par Brad Edwards, chercheur au National Laboratory de Los Alamos au Nouveau Mexique, en association avec une bonne douzaine d'universités américaines, a débouché en 2000 sur un rapport très complet <http://www.niac.usra.edu/studies/472Edwards.html>, complété en 2003. La solution préconisée est clairement décrite par Edwards : un premier câble en nanotube, d'un rayon d'une dizaine de microns mais capable de supporter 500 kg, est envoyé en orbite géostationnaire au moyen d'un lanceur conventionnel. Des « cabines d'ascenseur » sont ensuite envoyées tous les 4 jours pendant 2 ans, grimpant le long de l'Ascenseur avec de nouveaux câbles destinés à renforcer le premier. Ces câbles sont reliés entre eux latéralement par des joints en

composite nanotube-époxy situés tous les 5 cm environ. Une fois ce « tricot » totalement achevé, le système final est alors capable d'accueillir des cabines de 20 tonnes. Cette technique de renfort progressif est somme toute traditionnelle : pour construire un pont suspendu au-dessus d'un ravin, il était classique d'envoyer d'abord une petite ficelle à l'aide d'un canon, puis d'y accrocher une ficelle plus grosse, puis un premier câble, etc., jusqu'à terminer par les câbles fins de support du pont ; le ravin est un peu conséquent ici, mais c'est bien la même idée !

Le câble en lui-même est plat, très fin mais relativement large, ressemblant un peu à une feuille de papier bien que beaucoup moins épais (environ 10 microns) dont la largeur augmenterait progressivement avec l'altitude, passant d'environ 5 cm au niveau du sol jusqu'à 12 cm vers l'« astroport géostationnaire », puis diminuerait au-delà. Cette nappe serait de plus incurvée et structurée en morceaux de 5 cm, cellules facilement réparables ou remplaçables. Cette forme optimale a été relativement complexe à déterminer, prenant en compte toutes les contraintes météorologiques à basse altitude, mais aussi risque de collision avec des débris ou des micrométéorites au-delà. Le premier câble complet pèserait environ 18 tonnes : certes, cela peut paraître beaucoup, mais la masse n'est que de 200 grammes par kilomètre, à comparer par exemple aux lignes téléphoniques où le plus petit câble pèse 4 kg par kilomètre. Le volume de ce premier câble serait un cylindre de 3 m de long et 2,5 m de diamètre, tout à fait comparable à un petit satellite conventionnel.

La question de l'énergie nécessaire à la montée est longuement débattue : un moteur conventionnel à essence ne marcherait pas bien du tout dans le vide et n'autoriseraient pas un trajet comparable à 2 tours du Monde. Des piles ou des batteries alimentant un moteur électrique seraient excessivement lourdes et on ne peut évidemment pas imaginer un simple fil électrique depuis le sol. Les piles à combustibles, comme celles utilisées sur la navette, nécessitent de très gros réservoirs d'hydrogène, dangereux, et demeurent également très lourds ; idem pour les volants d'inertie, sortes de gros rouleaux très lourds et tournant très vite, capable de stocker une énergie importante. Edwards a même considéré l'emport d'un petit réacteur nucléaire, mais c'est également bien trop lourd et générateur de radiations, donc requérant des blindages également fort lourds : il faut donc disposer d'une énergie venant de l'extérieur. L'énergie solaire semble trop faible, même en considérant de grands concentrateurs paraboliques, donc il faut diriger une certaine forme d'énergie directement vers la cabine d'ascenseur.

La solution proposée consiste à illuminer, à l'aide d'un puissant faisceau laser installé au sol, un grand panneau solaire de 3 m de diamètre fixé sur la cabine; le panneau convertit cette énergie photonique en énergie électrique,

ESPACE L'ASCENSEUR SPATIAL

utilisée pour alimenter le moteur électrique de la cabine.

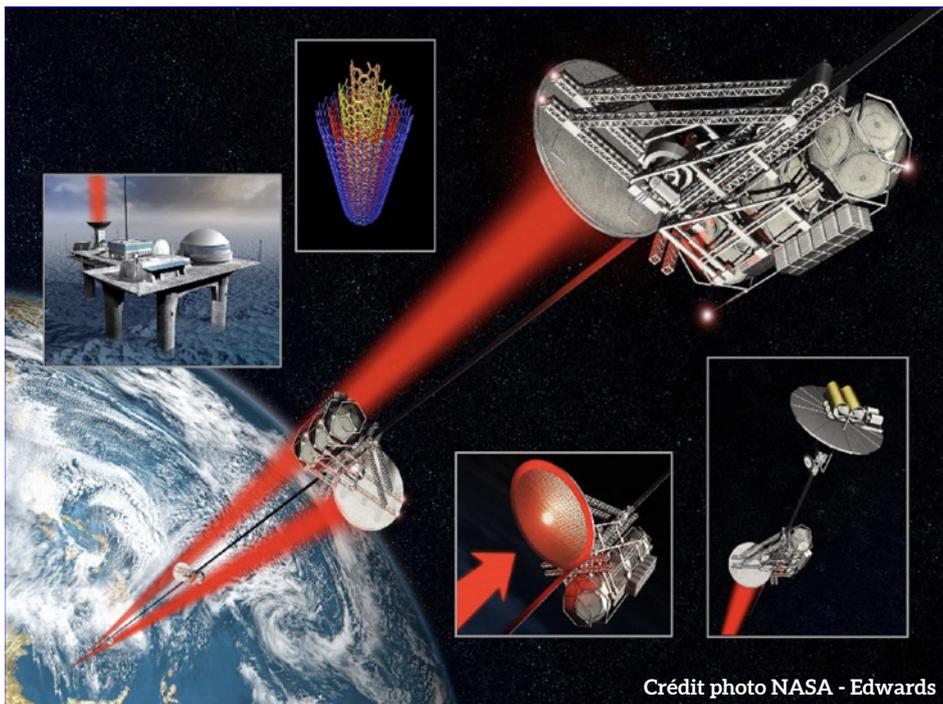
Le laser proposé est un laser à électrons libres alimentant un miroir déformable de 12 m de diamètre, permettant de changer le point de focalisation au fur et à mesure de la montée de la cabine et d'adapter le faisceau en fonction des perturbations atmosphériques. Les puissances en jeu sont très significatives : pour une cabine standard de 20 tonnes montant à la vitesse moyenne de 200 km/h, il faut une puissance mécanique de 5 à 10 MW environ (comparable à celle d'un TGV), donc probablement un laser du double de puissance ; ce type de laser existe, mais reste tout de même extrême. La focalisation du faisceau sur le panneau ne pose pas de problème car la puissance maximale n'est demandée qu'à basse altitude : au fur et à mesure de la montée, la puissance requise diminue jusqu'à devenir quasiment nulle à proximité de l'orbite géostationnaire.

L'accrochage de la cabine au câble est loin d'être évident : plusieurs solutions à base de lévitation magnétique sont proposées, ainsi que des solutions en forme de cabestan de marine, le câble zigzaguant entre plusieurs grosses roues, la friction lui permettant de monter. La solution finalement retenue aujourd'hui consiste en deux galets de part et d'autre du câble, pressés l'un contre l'autre, et dont la rotation permet d'assurer la montée ou le freinage lors de la redescente ; ces galets ressemblent un peu à des chenilles de tank, longues et plates, étalées sur plusieurs mètres le long du câble. La cabine d'ascenseur est fixée à ces galets : d'un côté de celle-ci se trouve la plateforme supportant la charge utile, satellite ou cabine de passagers à terme (le bar est à gauche en entrant), de l'autre les

différentes servitudes nécessaires au bon fonctionnement, panneaux solaires, électronique de conversion et d'alimentation des moteurs, antennes de communication avec le sol. Il faut une cabine d'environ 7 tonnes pour porter une charge utile de 13 tonnes, environ trois fois plus grosses que les plus massives des charges utiles injectées en orbite géostationnaire par les plus gros lanceurs actuels ; la montée prend une bonne semaine.

Le sommet de l'ascenseur, à 90.000 km d'altitude, comporte un contrepoids constitué de la plateforme initialement utilisée pour le premier déploiement, accolé à toutes les premières cabines qui avaient servi à assembler le câble final ; grâce à cette masse, il n'est pas nécessaire de déployer toute la longueur théorique. Ce contrepoids fait encore l'objet de plusieurs discussions : une des idées initiales consistait à domestiquer un petit astéroïde, pour le fixer au sommet du câble juste au-dessus de l'altitude géostationnaire ; l'idée d'un long câble a cependant été retenue afin de conserver la possibilité d'injecter des charges utiles vers n'importe quel point du système solaire. L'optimisation faite par Edwards a néanmoins permis de raccourcir le câble de plus de 50.000 km, et d'utiliser de façon subtile les éléments ayant servi à l'assemblage initial.

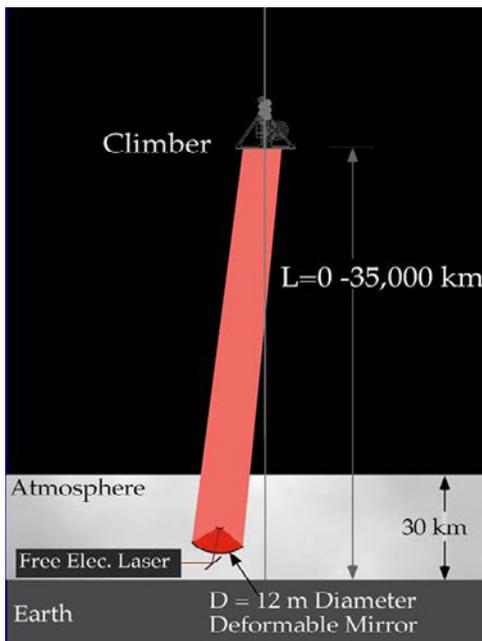
Le câble est fixé à une plateforme marine dérivée d'une plateforme pétrolière, un peu à l'instar du concept Sea-Launch qui permettait l'opération du lanceur Zenit-3SL par un consortium russo-ukraino-américano-norvégien depuis l'archipel de Kiribati. Une telle plateforme, mobile, peut changer de localisation en



Crédit photo NASA - Edwards

Alimentation par laser de l'ascenseur spatial

fonction des risques de collisions entre le câble et les satellites en orbite terrestre, et permet également de réagir en cas de problème météorologique sérieux. Autour de ce concept de plateforme flottante s'est tout de suite greffé un projet beaucoup plus diversifié : on en profitera pour avoir « le » port de plaisance de référence, royaume de la plongée sous-marine, paradis du farniente équatorial de luxe... Ces activités annexes sont souvent pour beaucoup dans la justification du succès certain annoncé pour le « port de l'Espace ».



Alimentation électrique de l'ascenseur par laser à électrons libres. crédit : Bryan Laubscher, Los Alamos National Laboratory

Edwards propose d'implanter l'Ascenseur dans l'Océan Pacifique, à 1.500 km environ à l'ouest des îles Galápagos pour bénéficier d'un des deux lieux relativement stables en termes de perturbations orbitales, mais aussi profiter d'une zone à météo très clémente : pas d'ouragans, ni d'orages violents, peu de coups de foudre et assez peu de nuages. Il privilégie ainsi le Pacifique Est plutôt que Sri Lanka, principalement pour des raisons météorologiques, bien que la proximité des Etats-Unis soit également un atout important.

Le rapport se conclut en soulignant l'importance du développement des nanotubes, disponibles selon lui vers 2010, et établit une liste longue et précise des priorités à suivre pour ce développement. Parmi ces priorités, il faut choisir entre une transmission de puissance par laser ou par micro-ondes, trouver le moyen de la focaliser efficacement sur les panneaux récepteurs, résoudre le problème des collisions avec les objets en orbite basse, évaluer les conséquences d'une rupture du câble, etc. La dernière recommandation porte sur l'estimation des

coûts de développement d'un tel système, et conclut en suggérant de continuer l'étude ! De fait, Edwards et son équipe mèneront à un complément d'étude très significatif jusqu'à 2003, culminant avec la sortie d'un livre « The Space Elevator (Edwards and Westing, 2003) ».

En parallèle de ces études, le premier grand colloque sur le thème de l'Ascenseur Spatial est organisé par le centre Marshall de la NASA en Juin 1999 : symbole très fort, c'est le centre chargé du développement de tous les lanceurs américains depuis la première adaptation des V2 récupérés après la seconde guerre mondiale jusqu'à la navette américaine et les lanceurs SLS. Ce colloque, également très exhaustif, donne lieu à un rapport concluant sur la faisabilité de l'Ascenseur Spatial, et proposant de nombreuses variantes, des Ascenseurs en orbite à beaucoup plus basse altitude, d'autres sur la Lune ou sur Mars... Depuis 2002, un colloque annuel dédié a lieu sur le sujet et de très nombreuses publications sont présentées dans tous les grands congrès astronautiques. Une publication très complète sur le sujet a été réalisée par l'IAA en 2013, « Space Elevators: an Assessment of the Technological Feasibility and the Way Forward ».

À en juger par le nombre de chercheurs travaillant sur le sujet, et l'optimisme ambiant de leurs publications, on pourrait croire que le développement de l'Ascenseur n'est plus qu'une question de jours... Et pourtant, des difficultés phénoménales restent à résoudre.

DIFFICULTÉS INSURMONTABLES, OU SIMPLEMENT MOTIVANTES ?

Comme le dit Edwards dans son rapport, l'examen des difficultés potentielles peut se faire suivant la célèbre loi de Murphy : « si quelque chose peut se passer mal, ça se passera mal ».

La difficulté fondamentale, primordiale, qui surpasse toutes les autres, concerne le risque de collision avec les satellites et les débris en orbite autour de la Terre : chacun de ces objets traverse l'équateur deux fois par orbite, c'est-à-dire 2 à 30 fois par jour suivant l'altitude ; si ce passage se fait à la longitude exacte de l'Ascenseur, il y a risque de collision et d'endommagement, voire de rupture, de celui-ci.

Or de tels objets sont très nombreux : aujourd'hui, sur la base du catalogue entretenu par l'USSpacecom, organisme militaire américain de surveillance de l'Espace, corroboré par le catalogue élaboré par les autorités françaises, près de 34.000 gros objets, dont 20.000 catalogués, orbitent autour de la Terre, objets typiquement de la taille du poing ou plus gros. On dénombre parmi eux 1.500 satellites actifs manœuvrables environ, contrôlés, ainsi que 6.000 satellites usagés et étages supérieurs abandonnés.

Les petits objets sont bien plus nombreux encore : il y a environ 900.000 objets d'un diamètre supérieur à 1 cm et environ 130 millions d'objets supérieurs à 1 mm. Or même l'impact d'un tout petit objet peut s'avérer catastrophique : l'énergie dégagée par la collision est l'énergie cinétique de l'objet, donc est proportionnelle au carré de sa vitesse ; comme ces débris sont en orbite, leur vitesse est extrêmement élevée, de l'ordre de 30.000 km/h pour les orbites basses. A titre d'exemple, l'énergie dégagée par la collision d'une petite bille d'acier de 1 cm de rayon, est de plus de 1 MJ, soit autant que celle d'une grosse voiture s'écrasant à 140 km/h sur un mur ! Ne parlons même pas des objets plus gros... Les objets les plus dangereux sont essentiellement présents en orbite basse, entre 500 et 1.500 km d'altitude ; en deçà, le nettoyage naturel par frottement atmosphérique fait qu'il ne subsiste que peu de débris ; au-delà, les orbites sont bien moins utilisées, puis les vitesses de collision diminuent rapidement.

On distingue du coup trois grands domaines de problèmes et de solutions associées :

Les petits objets, typiquement de moins de 1 mm de rayon, sont bien trop nombreux et difficiles à détecter pour en éviter la collision. Heureusement, le câble étant très fin, on s'attend à ce que ces petits objets ne fassent que le traverser en faisant un simple trou. Il faut faire en sorte que le défaut reste localisé et ne se propage pas, puis le réparer.

La solution retenue pour le câble est de le cloisonner en petits morceaux de quelques centimètres de longueur, un peu comme une longue chevelure séparée par de nombreuses barrettes. Un trou éventuel ne coupe qu'un faible nombre de cheveux et ne s'étend pas plus loin que les deux barrettes délimitant la cellule. La réparation, elle, se fait soit au moyen de cabines dédiées capables de détecter les trous puis de les reboucher (en fait renforcer la cellule) ou de changer complètement la cellule impactée. On a aussi suggéré tout simplement d'équiper chaque cabine d'un kit de réparation permettant à chaque montée d'entretenir la voie. C'est un problème classique d'entretien de la voirie, nous expliquent les promoteurs : la chaussée s'use, il faut l'entretenir !

Les objets centimétriques posent plus de problèmes. En effet ils demeurent trop petits pour être détectés, mais leur impacts sont très énergétiques ; on estime qu'il y aurait environ 14 impacts de cette classe chaque jour. Comme pour les plus petits impacts, il est proposé de les réparer au fur et à mesure ; cela signifie néanmoins une activité très significative pour les cabines d'ascenseur et on peut s'attendre à ce qu'elles soient fortement ralenties par ces réparations pendant la traversée des zones les plus densément peuplées en débris,

Les plus gros objets orbitaux, enfin, sont catalogués donc nous savons où ils se trouvent et nous pouvons estimer à l'avance les risques de collisions. Une collision avec un objet de la taille d'un satellite entier ou d'un étage supérieur sectionnerait potentiellement le câble et doit être évitée à tout prix. On estime qu'il y aurait deux passages à moins de 1 km d'un gros objet chaque jour ; le problème tient alors essentiellement du fait que 1 km est également l'ordre de grandeur de la méconnaissance que nous avons des paramètres orbitaux de ces objets ; il passe à 1 kilomètre, à 1 kilomètre près...

Mais que faire alors ? Certains ont proposé d'arrêter toute activité satellitaire à basse altitude, mais ils ont été virés... On peut plus raisonnablement demander au satellite de manœuvrer, mais dans la très grande majorité des cas, ce sont de vieux objets, abandonnés, sans aucune possibilité d'action autonome. C'est donc bien le câble qui doit éviter la collision.

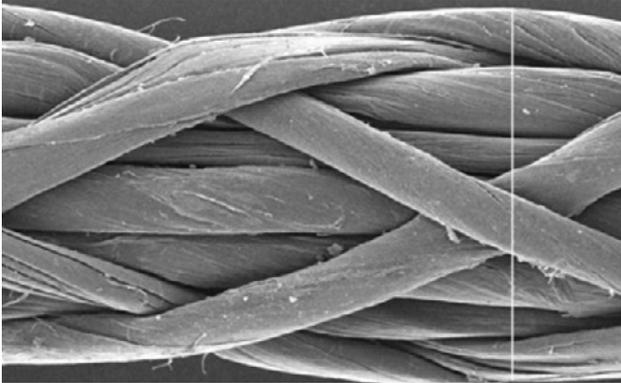
La solution préférée aujourd'hui consiste à déplacer la base du câble : la plateforme marine à laquelle l'Ascenseur est fixé est mobile, et peut donc se déplacer continûment de quelques kilomètres en fonction du risque de collision.

Il est également possible, bien que nettement plus ardu, d'induire le long du câble une vibration d'amplitude suffisante pour éviter la collision : le principe est analogue à celui d'une corde attachée à la poignée d'une porte, et tendue à travers la pièce, un simple mouvement faible du poignet permet d'induire des vagues le long de la corde ; si celles-ci sont bien calculées, il y a une résonance, d'où une amplitude forte. Si on vise bien, on peut alors éviter le débris qui passera dans un des creux de vague ; pas trivial...

Certains ont également proposé de se servir de la réaction du câble sur les cabines montantes pour reculer celui-ci : en effet, quand une cabine monte, elle a tendance à faire reculer le câble par rapport à sa position d'équilibre, sous l'effet de la force d'entraînement de la Terre, appelée aussi force de Coriolis ; la montée d'une grosse cabine à 200 km/h inclinerait ainsi la partie inférieure de câble d'environ 1°, engendrant une déviation de près de 10 km à 500 km d'altitude, largement assez pour éviter un objet d'une dizaine de mètres. C'est néanmoins une solution peu robuste : s'il faut avoir une cabine au bon endroit, à la bonne vitesse, chaque fois que se présente une alarme...

La dernière solution, la plus élégante sans doute, consiste à avoir plusieurs bases comportant chacune un câble, ceux-ci ne se regroupant pour n'en former qu'un à quelques centaines de kilomètres d'altitude, un peu comme le Golden Gate Bridge de San Francisco où tous les câbles de support du pont se rejoignent en quatre points forts. En tendant plus ou moins chacun de ces câbles,

on peut facilement bouger horizontalement le point de regroupement, donc de fait déplacer tout l'Ascenseur sans pour autant devoir bouger la base elle-même.



*Tresse de nanotubes de carbone.
crédit : Nanocomp Technologies*

Comme on peut le voir, des solutions sont proposées pour éviter les gros objets. La réparation des trous semble plus ardue : il faut imaginer un percement continu du câble par de petits débris ou des micrométéorites, les trous pouvant atteindre plusieurs millimètres de diamètre, avec une réparation impérative et constante ; le procédé de réparation n'est pas évident, et on sent bien que ce n'est pas facile à 200 km/h... Cependant, la zone potentiellement affectée est très limitée : on peut sans problème augmenter fortement la largeur du câble entre 500 et 1500 km d'altitude, voire même le « ré-enrouler » de temps en temps pour le remplacer par un câble neuf. A priori, rien de rédhibitoire, donc.

La deuxième grosse difficulté concerne la stabilité orbitale de l'ensemble : l'équateur terrestre a la fâcheuse particularité d'être à 23° du plan de l'écliptique, donc du plan dans lequel se déplacent, en apparence, le Soleil et la Lune (à 5° près). Du coup, ces deux astres perturbent notablement la stabilité de notre Ascenseur en l'attirant perpendiculairement au plan équatorial. A titre d'exemple, un gros satellite en orbite géostationnaire dépense une centaine de kilos de carburant chaque année pour se maintenir à poste ; s'il ne le faisait pas, il tendrait à avoir un mouvement Nord-Sud de plus en plus important, en forme de 8, d'une amplitude pouvant atteindre +/- 18° soit +/- 13.000 km ! On imagine aisément que cela puisse poser un problème pour contrôler le sommet de l'Ascenseur.

C'est d'autant plus compliqué que la situation d'équilibre dépend en fait de l'altitude : dans une publication importante (IAC-06-D4.2.04), Lubos Perek, très estimé collègue astronome tchèque, montre que l'inclinaison de stabilité et la période associée, donc le mouvement naturel global d'un point donné du câble, dépend en premier ordre de son altitude. En bref, c'est très compliqué car chaque point de l'Ascenseur a tendance à vouloir vivre sa vie

indépendamment des autres. Il s'ensuit un mouvement très complexe, certains points étant au Nord quand les autres sont au Sud, sans possibilité réelle de contrôler le tout.

En plus de ces mouvements globaux induits par les perturbations gravitationnelles qui s'exercent sur le câble, celui-ci réagit également suivant ses modes propres, soit latéralement, un aller-retour pouvant prendre jusqu'à 7 heures, soit longitudinalement le long du câble comme un ressort, avec une périodicité de 2 heures. Le mouvement global du câble, très faiblement amorti, résultant des perturbations luni-solaires, de l'effet induit par l'aplatissement de la Terre, et de la force générée par les cabines montant et descendant le long du câble, devient extrêmement complexe à prédire et à contrôler.

« Et après ? » répondent les promoteurs du système... C'est vrai, rien n'est facile, mais on n'a pas besoin de savoir précisément où se trouve chaque point de l'Ascenseur ! Il faut comprendre ce qui se passe à la base géostationnaire, car c'est là qu'on injecte les satellites en orbite, mais si les autres points font la danse de Saint Guy, peu nous chaut ; on a juste besoin d'un bon modèle global et de quelques témoins le long du câble pour nous dire ce qui se passe, et ça suffit !

La troisième difficulté majeure, voire bloquante, concerne la résistance du câble. Certes la contrainte à rupture mesurée des nanotubes de carbone (200 GPa) est théoriquement bien plus élevée que le strict besoin (70 GPa) mais le diable est dans les détails. D'abord il subsiste un flou important concernant la performance réelle des nanotubes, avec des variations d'un facteur 10 ou plus suivant les articles ; l'activité est trop récente pour avoir un avis tranché sur la question.

Il faut également tenir compte de la réalité des productions ; il y a toujours des défauts, c'est une constante thermodynamique : il peut manquer ici une liaison, là un atome ou deux ; ces défauts représentent toujours une fragilisation du matériau, et la résistance à considérer globalement est naturellement celle du point le plus faible. Les fibres seront tressées ; il n'est pas encore question de produire une « monofibre » parfaite de 110.000 km de long, donc il faudra les assembler entre elles comme les torons des câbles métalliques classiques. Cela se traduit à nouveau par une perte significative de résistance du câble, tant liée aux angles des fibres individuelles qu'aux recouvrements aux niveau des liaisons. Enfin, on montre qu'une fibre compressée latéralement, sous l'effet des galets de l'ascenseur, perd rapidement en résistance mécanique.

Globalement, il est loin d'être prouvé aujourd'hui que nos câbles composés de fibres de nanotubes de carbone,

ESPACE L'ASCENSEUR SPATIAL

imparfaites et comprimées, soient à même de résister aux contraintes imposées par un ascenseur spatial.

Heureusement (il y a toujours une lueur d'espoir...), les progrès réalisés récemment en matière de Graphène (feuilles 2D de carbone) sont très prometteurs. Des plaques de 1 m² ont été produites récemment, avec des performances en traction et stabilité meilleures semble-t-il que les structures à base de nanotubes... A suivre !

Plusieurs autres points critiques méritent un examen attentif, mais aucun ne semble insurmontable :

La corrosion du câble est un danger majeur mettant potentiellement en péril notre Ascenseur : dans l'atmosphère, à très haute altitude, l'Oxygène atomique, variété monoatomique très active, s'avère extrêmement corrosive, surtout pour des composés en Carbone comme le câble de l'Ascenseur. Pour combattre cette corrosion, il est nécessaire de déposer sur toute la surface entre 60 et 800 km d'altitude une fine couche d'Or ou de Platine, voire de Nickel, en prévoyant de la remplacer fréquemment. Bon, c'est techniquement ardu, c'est délicat à contrôler, c'est cher, mais c'est tout à fait faisable, sans grande difficulté même.

Et que se passe-t-il si le câble casse ?

Toute la partie au-dessus de la zone cassée va s'éloigner de la Terre : en effet, son centre de gravité, par définition, sera au-dessus de l'orbite géostationnaire, donc aura spontanément une force centrifuge bien supérieure à l'attraction terrestre ; cette portion du câble s'éloignera donc de la Terre. On peut juste espérer qu'elle ne fera pas un Strike au passage sur la totalité des satellites géostationnaires actifs...

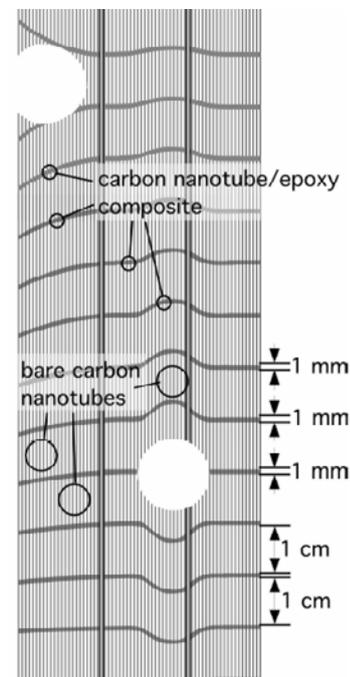
La partie en dessous, au contraire, a tendance à retomber, son centre de gravité allant à une vitesse bien inférieure à la vitesse orbitale. Le câble tombera donc sur l'équateur, en s'enroulant en quelques heures sur toute la périphérie de la Terre. L'effet n'est pas facile à imaginer : la masse du câble n'étant que de 200 g par mètre linéaire, soit une densité à peine supérieure à celle du papier que vous tenez en main, celui-ci peut flotter et tomber tout doucement en planant jusqu'au contact avec la surface ; mais a contrario, vu son extrême résistance mécanique, il est possible qu'il découpe tout sur son passage sans se casser comme un fil à couper le beurre.

Le seul problème sérieux dans ce cas est un problème de santé publique : les nanotubes de Carbone, fibres microscopiques, présentent un danger tout à fait analogue à celui généré par l'amiante, danger d'inhalation et de pollution des alvéoles pulmonaires. Nul besoin d'ailleurs que le câble soit coupé pour rencontrer ce questionnement, le

simple frottement répété des galets de transmission de la cabine sur le câble va générer une foultitude de nanofibres et nanoparticules libres dans l'atmosphère, susceptibles de s'infiltrer jusque dans les cellules, en gênant potentiellement les mécanismes cellulaires eux mêmes.

Une réglementation est en cours d'élaboration depuis 2009, et il est possible, voire probable, que ces fibres fassent l'objet dans les années de restrictions de production et d'utilisation.

Si une cabine, un « climber » comme l'appellent les américains, se coince quelque part en chemin durant une montée, que peut-on faire ? Le schéma proposé est de redescendre le câble, en le ré-enroulant à sa base, si la cabine est coincée à basse altitude, typiquement moins de 10 kilomètres. Si l'incident survient à proximité de la base Géostationnaire on peut adopter une technique similaire en déroulant plus de câble à la base pour faire monter la cabine. Sur les altitudes intermédiaires, le problème peut s'avérer bien plus ardu et nécessiter un McGyver innovant. Pour mémoire, rappelons qu'un aller-retour d'une cabine représente près de deux fois le tour de la Terre, avec une puissance comparable à celle d'un TGV, sans possibilité d'entretien...



Design typique du câble comportant des trous dus aux débris. crédit : NASA - Edwards

Le câble serait également une superbe cible pour tous les saboteurs du monde entier, terroristes, maîtres chanteurs et autres fanatiques. Cependant, il serait en principe relativement facile à protéger : son emplacement au large des îles Galápagos le rend peu accessible, la zone qui entoure la base peut être rendue interdite au même

titre qu'une large zone militaire, surveillée par des satellites dédiés et protégée par la force d'intervention ad hoc. Longtemps mentionné comme majeur, ce problème potentiel n'apparaît pas aujourd'hui comme rédhibitoire.



*Concept d'ascenseur spatial habité.
crédit Obayashi Corp.*

Comme on l'a vu, le câble est un excellent conducteur électrique, mille fois meilleur que le Cuivre ; n'y va-t-il pas du coup un risque de provoquer un court-circuit entre l'Espace et la Terre, avec des courants électriques extrêmes détruisant le câble ? L'extrémité du câble serait au-delà de la magnétopause, frontière du champ magnétique terrestre qui nous protège du vent solaire ; le câble pourrait du coup conduire vers la Terre toute sorte de particules chargées. Le câble servirait également de chemin tout tracé pour un coup de foudre, certainement destructeur...Tous calculs faits, non : aucun risque paraît-il ; la zone dans laquelle l'Ascenseur serait implanté a une activité très faible, avec moins de 10 éclairs par km² par an : on peut déplacer la base du câble si le risque de foudre devient ponctuellement inacceptable ; par ailleurs, les courants induits dans le câble resteraient faibles ; enfin, les nanotubes de Carbone ne fondent qu'à 6.000° ce qui garantit une certaine marge.

La météo est globalement très clémente dans la zone sélectionnée pour le déploiement du câble ; en fait, quand on regarde soigneusement une carte présentant tous les phénomènes redoutés, on remarque que la zone choisie est un petit havre de calme : pas de tsunamis, pas d'ouragans, des pluies faibles seulement avec des vents très modérés, etc.... Ces vents pourraient exciter les modes de vibration du câble, mais tous calculs faits, cet effet resterait marginal. Certains aspects peuvent s'avérer délicats, comme la formation de glace sur le câble en haute altitude, mais on peut toujours imaginer une solution, comme une cabine chasse-neige qui ouvre la voie par exemple. En prenant juste quelques précautions en ce qui concerne la conception de la partie la plus basse du câble, il ne subsiste pas de problème vraiment bloquant.

N'ENTERRONS PAS LES LANCEURS TROP VITE...

A première vue, l'ascenseur spatial permet d'imaginer une révolution dans l'accès à l'espace, très facile et peu cher : il suffit d'embarquer la charge utile, potentiellement habitée, à bord de la cabine et d'appuyer sur le bouton de destination !

En réalité, le bât blesse sous de nombreux aspects.

Primo, l'ascenseur ne permet d'accéder qu'à l'orbite géostationnaire à 35.800 km au-dessus de l'équateur ; en effet, tout point du câble d'altitude plus faible se déplace plus lentement que la vitesse qui serait requise pour rester en orbite. La vitesse orbitale décroît avec l'altitude (7.800 m/s à 200 km d'altitude, 3.000 m/s en GEO) alors que la vitesse d'entraînement due au câble augmente avec l'altitude (480 m/s à 200 km d'altitude mais bien 3.000 m/s en GEO). Du coup, tout objet séparé en dessous de GEO a une vitesse trop faible pour rester en orbite et retombe sur Terre. Par ailleurs, ces orbites sont, par définition même, équatoriales ; il n'est pas possible à partir du câble de viser une orbite inclinée, par exemple survolant les pôles. Cela réduit très fortement l'intérêt de l'ascenseur. Heureusement, il reste la perspective de s'en servir pour atteindre des cibles bien plus lointaines, au-delà de GEO, comme les points de Lagrange, la Lune, Mars, et au-delà. Pour cela il faut monter à la bonne altitude, 45.000 km pour la Lune, 57.000 km pour Mars, 96.000 km pour Jupiter et les astéroïdes et surtout attendre un phasage parfait entre les orbites pour partir dans la bonne direction.

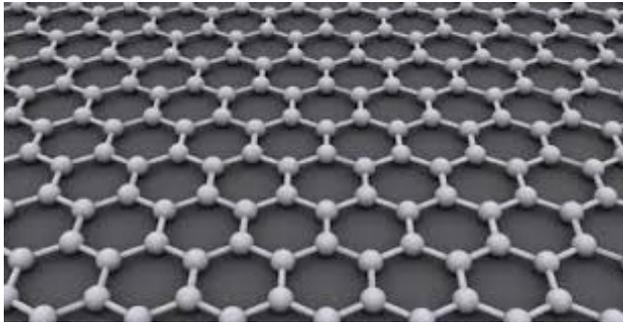
L'envoi d'humains pose également problème. En effet, en admettant qu'il y ait un marché pour le tourisme spatial en orbite géostationnaire, la limitation de vitesse à 200 km/h environ des cabines à la montée, dictée par la force perturbatrice de Coriolis, fait que la croisière dure plus d'une semaine, sans grand-chose à faire... (voir à ce propos l'analyse du Dr. Moustache de Marion Moutagne, <http://tumorrasmoinsbete.blogspot.com/2010/06/mardi-vers-linfini.html>). La cabine devrait de plus être bien blindée pour traverser les ceintures de Van Hallen, entre 2.000 et 6.000 km notamment, soit une journée de fortes radiations.

L'ascenseur spatial servirait donc un marché de niche composé quasi exclusivement de satellites géostationnaires assorti de quelques missions d'exploration planétaire.

Le second point qui pêche un peu est le bilan financier du système. Les promoteurs de l'Ascenseur Spatial en ont estimé le coût de développement à 6,3 milliards de Dollars, comparable au coût de développement d'un des lanceurs de nouvelle génération réutilisables étudiés de par le monde. D'autres auteurs, plus pessimistes ou

ESPACE L'ASCENSEUR SPATIAL

réalistes, ont évalué le coût de réalisation du système à 40 milliards de Dollars, ce qui n'est déjà pas pareil... Le coût opérationnel annoncé semble quant à lui très sous-évalué, avec un montant annuel de 250 millions de Dollars pour 50 missions (avec un seul câble ?), soit un coût de lancement de 250 \$/kg, 40 ou 50 fois plus faible que les tarifs pratiqués par les lanceurs actuels. De tels montants ne semblent toutefois pas réalistes, n'intégrant pas la maintenance et la réparation du câble, des cabines, des ergols de stabilisation de la station GEO, etc. Est-ce que cela suffirait déjà à payer le transport du satellite depuis son lieu de fabrication jusqu'à la base de l'ascenseur au large des Galápagos ?



Nappe de graphène

UNE PLÉTHORE D'ACTIVITÉS CONNEXES

Une particularité flagrante de l'ascenseur spatial réside dans le fourmillement d'idées plus innovantes les unes que les autres que ce concept inspire. En fait, il y a aujourd'hui tellement d'équipes qui croient en l'avenir de l'Ascenseur Spatial qu'on observe la création de très nombreuses start-ups en tous genres sur tous les sujets connexes...

La principale activité est naturellement liée au développement des nanotubes de Carbone ; celui-ci dépasse très largement, bien sûr, le simple cadre de la préparation de l'Ascenseur Spatial. Néanmoins, un concours de câble a démarré depuis quelques années, doté dès la première année d'un prix de 500.000 \$.

Quatre équipes ont participé au premier concours 2006, l'une d'elles atteignant une résistance intrinsèque proche de celle requise pour l'Ascenseur. Nous en sommes au concours 2019, avec des équipes très internationales parcourant les 200 m de câble sous ballon, avec défauts, à une vitesse impressionnante !

Un autre gros concours international a un succès fou : le « Climber competition », organisé par la Spaceward Foundation puis par X-Prize, regroupe tous les amateurs développeurs d'ascenseurs. La première édition en 2006 a réuni 12 équipes participantes ; la finalité était de proposer un système grimpeur de façon autonome, sous l'effet d'un

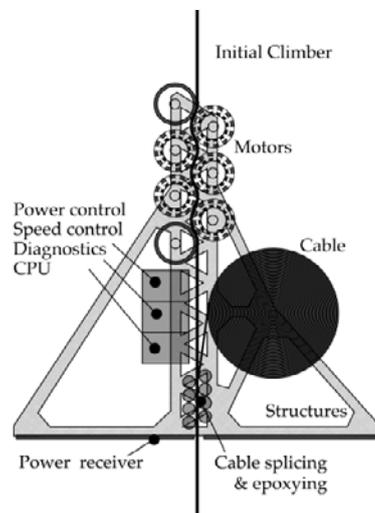
éclairage depuis le sol, à une altitude de 55 m à la vitesse moyenne de 1 m/s. Les compétiteurs sont venus avec d'étranges robots d'une vingtaine de kilos, grimpeur avec une facilité déconcertante le long d'un câble suspendu sous le crochet d'une grue à 50 m du sol. La compétition la plus célèbre actuellement, le European Space Elevator Challenge, est organisée tous les deux ans par l'Université Technique de Munich

<https://euspec.warr.de/background?lang=en>

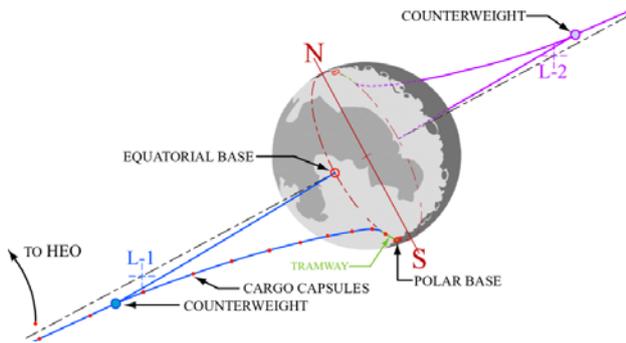
Ces concours sont intéressants car ils impliquent la maîtrise de plusieurs problèmes en même temps : une motorisation électrique légère et fiable, une bonne focalisation d'énergie optique, une bonne qualité de réception d'énergie photovoltaïque, la maîtrise des problèmes de thermique de l'ensemble, l'électronique générale... de quoi motiver plusieurs équipes très compétitives et dériver sur des activités en marge de l'Ascenseur Spatial. Ainsi, l'équipe LiftPort s'est lancée dans la production de masse de nanotubes de Carbone, se focalisant sur la commercialisation de structures ultra résistantes ; elle propose également des financements de start-ups dans l'optique de réaliser l'Ascenseur Spatial dans les 15 ans qui viennent.

Certains groupes se sont spécialisés dans la transmission de puissance à distance : c'est une technologie fondamentale pour alimenter une cabine à distance (jusqu'à 36.000 km d'altitude) et les applications dérivées sont extrêmement riches. Deux start-ups se sont ainsi créées sur ce principe, l'une proposant l'alimentation de petits robots intervenant à distance dans un milieu nucléaire sur du combustible irradié.

Notons que ces concours ont réussi à attirer plus de 20.000 personnes, 7 universités et 3 industriels majeurs ! Inutile de dire que certains ont compris où se trouvent les domaines principaux d'innovation !



Un « climber », cabine d'ascenseur. crédit NASA



Principe d'un ascenseur lunaire
crédit Jérôme Pearson - STAR Inc.

L'Ascenseur Spatial présente également un aspect fondamental : il fait rêver ! Ce caractère fédérateur autour d'un projet à fort potentiel onirique est fort justement souligné par de nombreux auteurs. Peter Swan a ainsi proposé de focaliser les travaux autour d'une vision très futuriste, « la route vers des possibilités infinies », et de faire le parallèle avec la découverte de l'Amérique ou les débuts de l'aéronautique ; les difficultés de demain sont là, mais la promesse d'après demain est telle que rien ne peut arrêter le projet...

BON, ON EN DÉDUIT QUOI ?

C'est crédible, non ?

De nombreuses équipes travaillent sur ce concept dans le monde et des progrès quotidiens sont enregistrés. Une gros industriel du bâtiment Japonais, Obayashi, a publié une étude complète sur une proposition de développement en 2050 avec des cabines de 100 tonnes https://www.obayashi.co.jp/en/news/detail/the_space_elevator_construction_concept.html.

Un consortium d'études mené par Pete Swan [HYPERLINK «https://isec.org/» https://isec.org/](https://isec.org/) fait régulièrement progresser le concept en résolvant un à un les problèmes rencontrés, même si certaines solutions peuvent sembler complexes, comme le récent remplacement de l'alimentation par laser par 60 hectares de panneaux solaires.

Certains schémas d'Ascenseur non décrits ici permettraient d'avoir, sur un câble unique, plusieurs cabines simultanément, certaines montant pendant que d'autres descendent, le tout à iso énergie globale : l'énergie récupérée sur les cabines descendantes peut être utilisée pour alimenter les cabines montantes. On arrive ainsi à un bilan énergétique quasiment nul, aux frottements et rendements mécaniques près.

D'après les promoteurs, la révolution qu'apporterait l'ascenseur permettrait d'aborder le développement de l'Espace sous un angle totalement différent : les satellites pourraient être construits de façon bien plus simple, n'ayant plus à supporter les charges mécaniques associées aux lancements (vibrations, chocs, bruit, accélérations...) et ayant bien moins de contraintes qu'aujourd'hui en termes de volume, donc de structures déployables, complexes et défiabilisantes. Les satellites pourraient être testés sur place avant le début de leur vie opérationnelle, et pourraient être redescendus d'orbite pour réparation le cas échéant, voire simplement pour mise à la retraite après bons et loyaux services ; ils deviendraient de fait beaucoup moins onéreux qu'aujourd'hui, donnant une possibilité d'utilisation du spatial à des pays émergents.

Mentionnons dans cette conclusion une perspective très prometteuse, à l'étude actuellement, consistant à placer un ascenseur spatial sur la Lune. Celui-ci partirait de la surface de la Lune en direction de la Terre, avec un centre de gravité situé sur le point de Lagrange L1 du système Terre-Lune, point très particulier dans l'espace et relativement fixe, résultant de l'attraction conjointe de la Terre et de la Lune ; une cabine montant le long de ce câble puis s'en détachant, au-delà de L1, reviendrait directement sur Terre sans propulsion. Le câble serait beaucoup plus court, de l'ordre de 8.000 km et ne poserait aucun problème de contrainte mécanique, donc pourrait tout à fait être réalisé en Dyneema© ou toute autre fibre moderne. Autour de la Lune, la plupart des problèmes de l'ascenseur terrestre disparaissent : pas de débris, pas d'oxydation, pas de vent, pas de foudre, moins de terroristes... Un tel ascenseur pourrait constituer une solution très élégante pour ramener sur Terre le produit des futures mines sélénites !

Alors, cette porte vers les étoiles s'ouvrira-t-elle un jour ou non ?

Pour avoir suivi ce sujet depuis plusieurs décennies maintenant, on peut noter que nous sommes passés progressivement d'une science-fiction totale à un concept beaucoup plus crédible, comportant certes des défis importants, notamment en matière de résistance de câble, d'alimentation électrique, et surtout de tenue aux impacts de débris toujours plus nombreux. L'ascenseur terrestre peut s'avérer non viable économiquement, mais il faut certainement s'atteler à l'étude de l'ascenseur Lunaire, si l'exploitation de notre satellite naturel est effectivement envisagée dans les décennies qui viennent.

Laissons donc le dernier mot à Sir Arthur C. Clarke : « L'Ascenseur Spatial se fera 50 ans après que les derniers rieurs se seront tus ». ■

LE LANCEMENT SPATIAL AÉROPORTÉ : DU CONCEPT À LA DÉMONSTRATION TECHNOLOGIQUE

par Nicolas Bérend, Julie Gauvrit-Ledogar et Jean Hermetz, ONERA

LE LANCEMENT AÉROPORTÉ À L'ONERA : DES PREMIÈRES ÉTUDES DEDALUS AU PROJET EUROPÉEN ALTAIR

Le développement du marché des petits satellites (de masse inférieure à 200 kg) met en évidence l'intérêt de disposer d'un système de lancement réellement adapté à ce type de charge utile, c'est-à-dire un petit lanceur permettant de faire un lancement « à la demande » sur l'orbite souhaitée. En effet, les solutions utilisant de « gros » lanceurs ne permettent pas une telle souplesse, qu'il s'agisse du lancement en tant que passager secondaire (la date de lancement et l'orbite étant fixée par la charge utile principale) ou du lancement « par grappe » (adapté seulement au lancement simultané d'un grand nombre de petits satellites sur le même type d'orbites).

Le lancement aéroporté, c'est-à-dire l'idée d'utiliser un avion porteur pour larguer la fusée en altitude au lieu de la faire démarrer du sol, est une solution a priori séduisante pour un petit lanceur. L'intérêt du largage en altitude est de gagner en performance, du fait de la réduction de la traînée atmosphérique subie par le lanceur et du meilleur taux de détente des gaz éjectés par le moteur fusée. Un lanceur aéroporté sera donc en principe plus petit, donc moins coûteux, que son équivalent partant du sol, tandis que l'avion constitue, de fait, un 1er étage réutilisable du système. Un autre intérêt recherché avec le lancement aéroporté est l'idée de rapprocher les opérations de lancement de celles du monde aéronautique, pour plus de souplesse et une réduction des coûts d'opération.

L'ONERA étudie ce concept depuis une quinzaine d'année en coopération avec le CNES, et en particulier l'idée d'utiliser comme porteur un drone plutôt qu'un avion. L'intérêt se situe bien sûr le plan de la sécurité (pas d'homme à bord) mais aussi d'un point de vue « système » car on peut ainsi concevoir un porteur optimisé pour la mission de lancement, sans les contraintes que peut avoir la réutilisation d'un avion existant, qu'il faut plus ou moins adapter.

Dès 2005, le projet DEDALUS (Design of Dual-use Air-Launch UAV System) était consacré à ce thème, et les premiers travaux étaient ciblés sur l'idée d'un drone polyvalent et la recherche de synergies économiques entre la mission de lancement et d'autres missions plus

classiques comme la surveillance. À partir de 2008, la collaboration entre le CNES et l'ONERA se poursuit avec l'étude de différentes variantes du concept de lancement par drone, avant de retenir l'idée d'un drone conçu spécifiquement et de façon optimale pour la mission de lancement, de sorte à obtenir le meilleur compromis entre performances et coût. C'est le concept L3AR (Lancement Assisté par Aéroporteur Automatique Réutilisable), qui devient le concept aéroporté de référence de PERSEUS¹, projet du CNES destiné à fédérer des travaux étudiants sur le thème des nanolanceurs, et auquel participe l'ONERA également. Tandis que le projet L3AR s'intéresse au futur système à échelle 1, les travaux du projet PERSEUS sur le lancement aéroporté visent à mettre en œuvre dans un environnement réel mais à échelle réduite la phase de séparation entre un porteur aérien et un lanceur. Pour cela, le véhicule expérimental EOLE, dédié au lancement aéroporté, est développé afin de compléter les simulations numériques, en particulier pour étudier les actionneurs utilisés pour la séparation et plus généralement la phase de largage, lesquels sont très difficiles à modéliser. Cet avion drone miniature capable de lancer une fusée en vol est co-développé par l'ONERA (maître d'œuvre), le CNES et la PME francilienne Aviation Design.

Parallèlement au projet PERSEUS, l'ONERA, avec 7 autres partenaires européens (CNES, Bertin, Piaggio Aerospace, NAMMO, GTD, SpaceTec et ETHZ) remporte en 2015 un appel d'offres du programme Horizon 2020 de la Commission Européenne, consacré à « l'accès indépendant à l'espace ». Il s'agit du projet ALTAIR, qui permet de poursuivre les travaux L3AR mais cette fois-ci à une échelle européenne et en collaboration avec des industriels. ALTAIR devient, par extension, le nouveau nom du concept L3AR. L'objectif est d'aboutir à une définition détaillée du système complet (porteur, lanceur et segment sol) mais aussi de lui associer un modèle économique et un plan de développement. Le projet, achevé fin 2019, est centré sur un système de lancement dont la mission nominale est le lancement d'une charge utile de 150 kg sur une orbite polaire à 600 km d'altitude. Le lanceur, de 26 tonnes, utilise pour les deux étages principaux des moteurs à propulsion hybride H₂O₂/HTPB et de la propulsion liquide monoergol H₂O₂ pour l'étage supérieur. Le porteur automatique est d'une masse totale au décollage de 64 tonnes et d'envergure 55 m (Figure 1).

¹ *Projet Etudiant de Recherche Spatiale Européen Universitaire et Scientifique lancé par le CNES en 2008. Le projet PERSEUS se poursuit aujourd'hui avec une orientation marquée vers le lancement réutilisable. <https://www.perseusproject.com/>*

LE LANCEMENT SPATIAL AÉROPORTÉ : DU CONCEPT À LA DÉMONSTRATION TECHNOLOGIQUE

En complément, ALTAIR inclut un volet expérimental utilisant le démonstrateur EOLE existant, afin de tester en conditions représentatives mais à échelle réduite des technologies prévues pour le futur système.

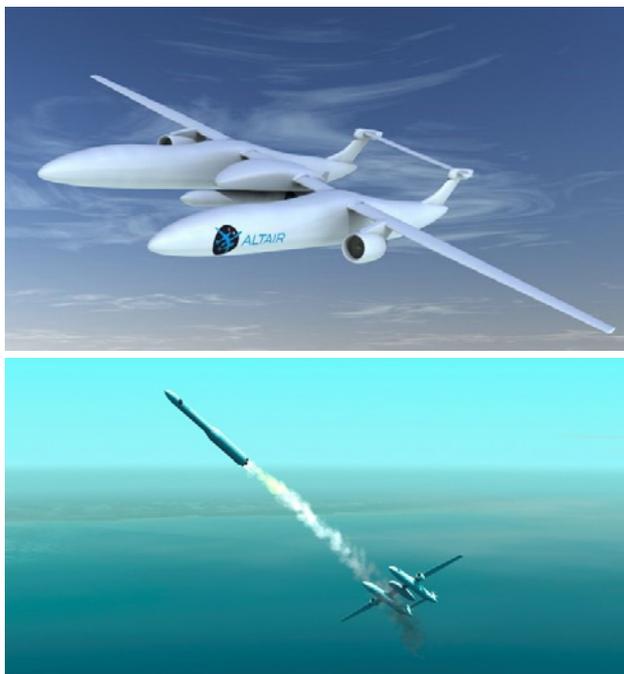


Figure 1 : Système de lancement aéroporté ALTAIR

LE DÉMONSTRATEUR EOLE - DE LA CONCEPTION AUX PREMIERS VOLS.

L'idée de développer un démonstrateur de lancement aéroporté à échelle réduite est née de la conjonction de deux éléments : d'une part, de la survenue d'échanges entre le CNES et l'ONERA autour de ce type d'outil experi-

mental en marge des études L3AR, et d'autre part, de la volonté du CNES de disposer d'un support aux expérimentations prévues sur le thème L3AR dans le cadre du projet PERSEUS qu'il venait de lancer à destination du monde étudiant.

Dans cette perspective, un groupe de travail fut mis en place pour analyser la faisabilité et le domaine d'intérêt d'un tel démonstrateur, puis en définir les objectifs. Le principal d'entre eux consiste à être capable de larguer, en situation représentative, des fusées, propulsées ou non, pilotées ou non, de la gamme des fusées ARES alors au cœur des travaux PERSEUS, en utilisant des dispositifs de séparation et largage (DSL) variés, dans des conditions cinématiques et dynamiques également variées mais maîtrisées, le tout en acquérant des données susceptibles d'aider à mieux comprendre, analyser, modéliser et simuler cette phase critique du concept de lancement aéroporté tel que dégagé dans les études L3AR.

Compte tenu de la gamme de masse et des dimensions des fusées pressenties, d'une analyse des conditions de largage et des risques associés, les grandes lignes du porteur ont ensuite été figées en croisant les impératifs de représentativité, issus des porteurs échelle 1 alors envisagés (par exemple un dérivé du drone HALE Global Hawk de Northrop Grumman), les objectifs expérimentaux et enfin les contraintes opérationnelles et de mise en œuvre d'un tel démonstrateur téléopéré (Figure 2).

La définition du démonstrateur a été réalisée en partenariat étroit entre le CNES, l'ONERA et Aviation Design (<https://aviation-design-uav.fr/>), PME française spécialisée dans la fabrication et la mise en œuvre de véhicules expérimentaux.

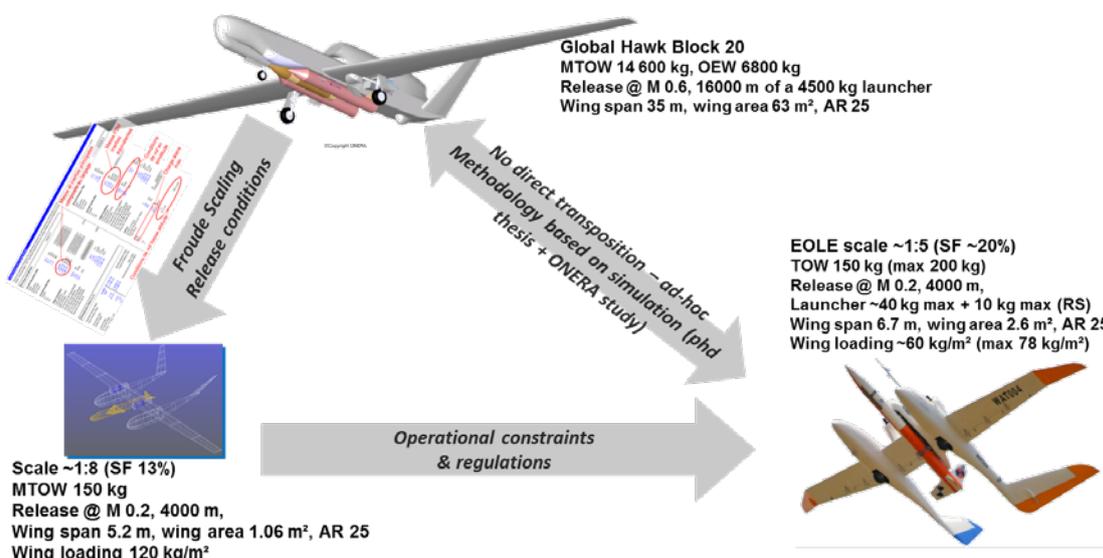


Figure 2 : Relations entre concept grandeur et démonstrateur EOLE

ESPACE

LE LANCEMENT SPATIAL AÉROPORTÉ : DU CONCEPT À LA DÉMONSTRATION TECHNOLOGIQUE

Le compromis trouvé a fait l'objet d'un brevet commun entre le CNES, l'ONERA et Aviation Design, déposé en même temps que débutait le développement du démonstrateur. Il fige une géométrie générale, directement liée à l'usage prévu, dont les grandes lignes sont : une voilure à grand allongement associée à une formule bi-fuselage pour placer la fusée dans le plan de symétrie et au centre de gravité du composite de façon à minimiser les effets inertiels de séparation, des moteurs placés à l'extrados de la voilure pour dégager au maximum la partie inférieure, un empennage en V pour limiter les risques de collision au largage et éloigner les surfaces du flux chaud des réacteurs.

Mené sous maîtrise d'œuvre ONERA en partenariat avec Aviation Design, le développement s'est déroulé en 3 grandes étapes, jalonnées par des revues formelles de définition selon la démarche projet du CNES : conception préliminaire (2009-2010), conception détaillée et fabrication (2010-2012), enfin tests de qualification, au sol puis en vol (2012-2017) (Figure 3).



Figure 3 : Vues du démonstrateur EOLE durant les essais de qualification à Saint Yan (2012-2016)

Sur la base de conditions de largage de référence (largage à Mach 0,3, 4000 m et sous ressource à 3 g), la conception préliminaire a figé la définition du porteur :

- masse au décollage de 150 kg (pour une masse à vide de 107 kg), pouvant être accrue à 200 kg,
- voilure de 6,70 m d'envergure dotée d'un profil laminaire ONERA, de surface 2,58 m² et d'un allongement de 17,
- deux turboréacteurs AMT Titan d'une poussée unitaire au sol de 40 daN,
- une large zone d'emport centrale dégagée avec des points d'accrochage reprenant les efforts sur les longerons de voilure.

Ces choix lui confèrent une capacité d'emport allant jusqu'à 50 kg et un domaine de vol large : plafond opérationnel théorique supérieur à 6000 m, vitesse jusqu'à 100 m/s, endurance de l'ordre de 1 h de vol, facteur de charge maximal en manœuvre de 4 g.

Par ailleurs, le choix d'automatiser le vol pour toutes les phases en dehors du décollage et de l'atterrissage, qui restent manuels, et l'obligation de mener des vols hors vue du télépilote du fait des conditions de largage, ont abouti à la définition d'une architecture avionique robuste à la simple panne pour l'ensemble des systèmes et à la double panne pour ceux dévolus à la sécurité/sauvegarde du vol. Cette dernière repose sur une double chaîne de déclenchement (une chaîne à disposition de l'équipe d'essais et une autre pouvant être laissée à l'officier sauvegarde du centre d'essais), d'un dispositif de sauvegarde constituée d'un parachute assurant l'arrêt du vol doublé par la coupure des moteurs et le braquage des ailerons en position de virage engagé. Cette définition fut alimentée par de nombreux échanges avec le centre d'essais initialement visé pour les futurs largages de fusée, en l'occurrence le centre DGA/EM situé à Biscarrosse, et fut complété ensuite par un moyen de localisation indépendant.

Sur cette base, la seconde phase dédiée à la conception détaillée et la fabrication a été lancée. La Figure 4 illustre le panel des travaux ONERA menés à cette occasion, tirant profit de la multidisciplinarité de l'Office : Essais soufflerie, calculs CFD et FEM, essais statiques de flexion (menés jusqu'à rupture de la voilure, en collaboration avec l'ISAE-SUPAERO), essais de vibration (GVT) pour la détermination de la base modale puis des limites de flottement, prédiction des performances, analyse des qualités de vol et définition des lois de pilotage-guidage-navigation, développement d'un simulateur de préparation d'essais et d'entraînement. Notons qu'un grand nombre d'étudiants a été impliqué dans ces travaux, en cohérence avec les principes PERSEUS².

De son côté, Aviation Design s'est chargé de la conception détaillée de la cellule, de l'avionique et de la station sol (en partenariat avec la PME luxembourgeoise LM Design) en se fondant sur son expérience issue de ses travaux passés, puis de la fabrication (2 cellules pour la disponibilité de rechanges) et de l'intégration de l'ensemble. La cellule est entièrement en matériaux composites (sandwich à base de fibres de carbone ou de verre selon les emplacements, associées à un matériau de type NIDA ou NOMEX), fabriquée à l'aide de moules usinés sur machine à commande numérique (Figure 5) ; l'avionique utilise des composants spécifiques à l'exception des actionneurs

² 60 étudiants dont 12 en Projets de Fin d'Année (PFE) réalisés au sein de l'ONERA, de diverses provenances (ISAE-SUPAERO, Arts et Métiers, IPSA, etc.).

LE LANCEMENT SPATIAL AÉROPORTÉ : DU CONCEPT À LA DÉMONSTRATION TECHNOLOGIQUE

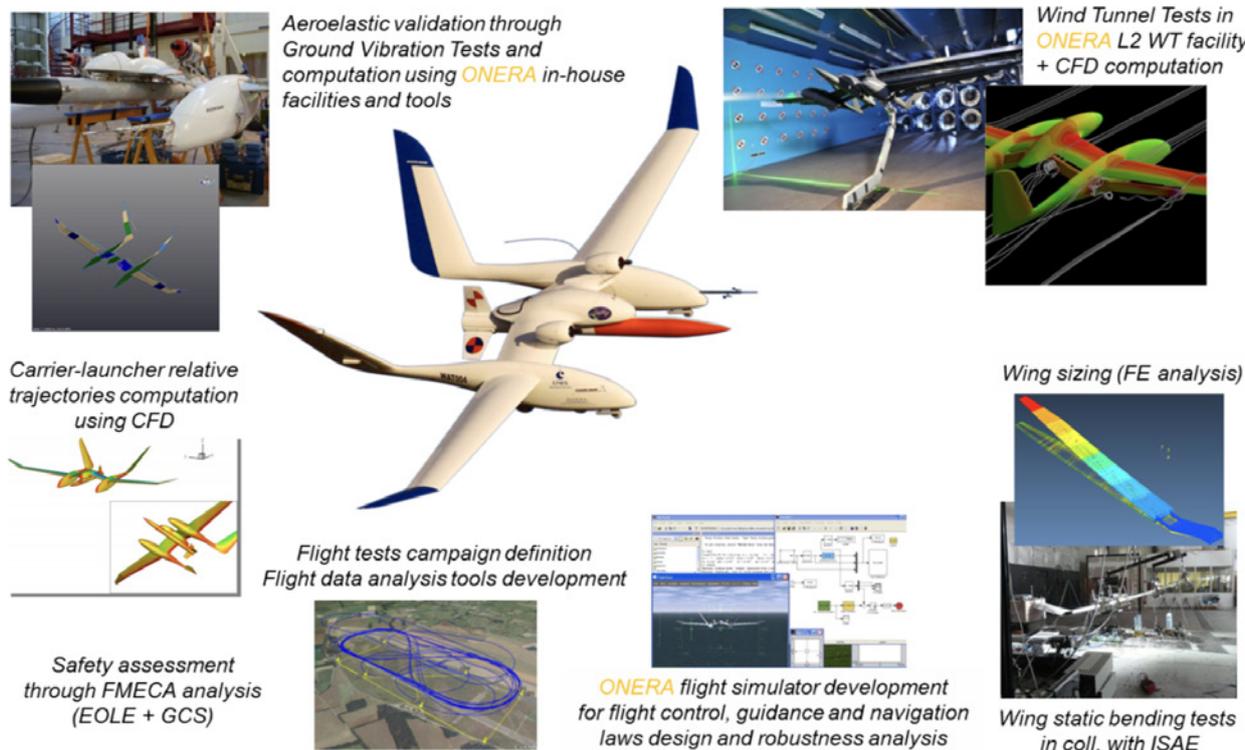


Figure 4 : Les principales activités de développement ONERA sur le démonstrateur EOLE

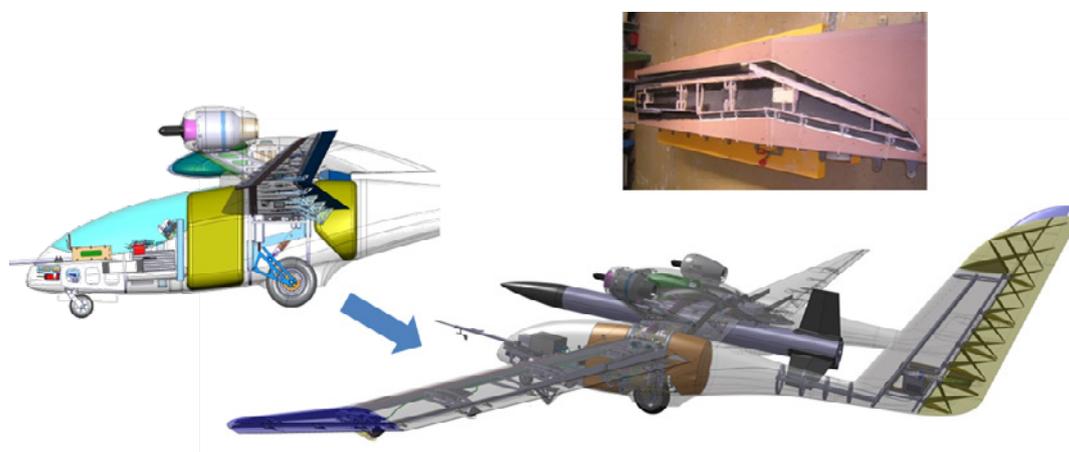


Figure 5 : Conception détaillée de la cellule - Crédit Aviation Design

choisis sur étagère. Côté fusée, une version dérivée de la fusée ARES, nommée ICARUS, a été développée par le GAREF et l'IPSA. Le système de séparation et de largage standard a quant à lui été conçu et fabriqué par l'UEVE.

Les premiers essais de qualification ont débuté en 2012 par des essais au sol principalement dévolus à l'avionique, puis à l'ensemble des systèmes (embarqués et sol). Le premier vol s'est déroulé sur l'aérodrome de Saint-Yan en 2013, sous la supervision de la DGAC (vol en vue du télépilote) dans une Zone Réglementée Temporaire autorisant des vols jusqu'à 500 m/sol et dans un rayon de

1 km autour du télépilote. Entre 2013 et 2014, 6 campagnes d'essais ont été menées pour ouvrir le domaine de vol dans la limite de la zone d'évolution autorisée, puis mettre au point successivement les lois de pilotage du mode stabilisé, pour basculer ensuite sur les modes de guidage et navigation (Figure 6), enfin sur la phase spécifique de largage réalisée sous forme d'une évasive (association d'une ressource suivie d'un basculement latéral et retour au vol horizontal sur un cap opposé au cap initial).

ESPACE

LE LANCEMENT SPATIAL AÉROPORTÉ : DU CONCEPT À LA DÉMONSTRATION TECHNOLOGIQUE

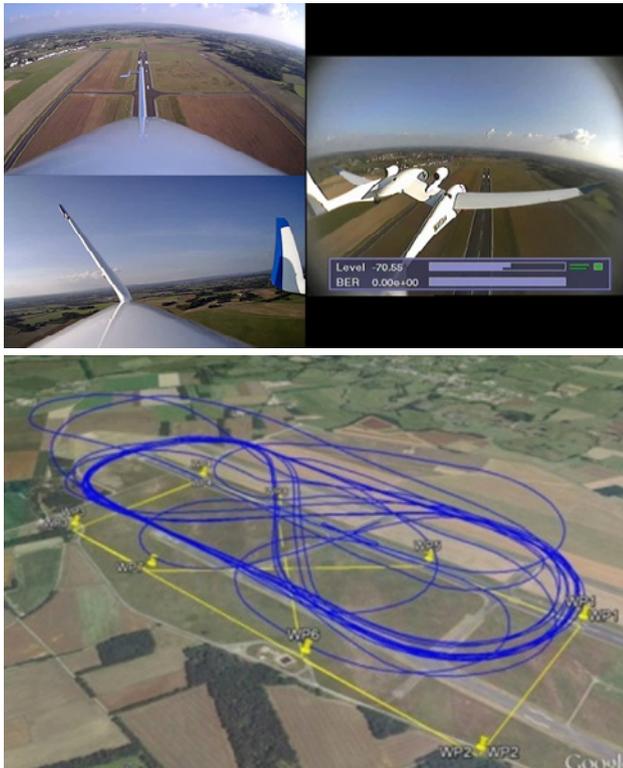


Figure 6 : Essais en vol de qualification à Saint-Yan
(à gauche : vues embarquées, à droite : trace de trajectoire
automatique)

Ces vols se sont déroulés avec ou sans fusée afin de valider les qualités de vol dans les deux configurations. Les performances ont également pu être vérifiées à cette occasion, tandis que les outils d'exploitation des données acquises durant le vol ont été mis au point. Début 2017, la décision a été prise de retenir le Centre Spatial Guyanais pour les vols avec largage. Ce site également choisi dans le cadre du projet européen ALTAIR, a conduit à réaliser des modifications du système expérimental autour des fréquences des liaisons de données, induisant la refonte du protocole de télémesure, et l'ajout d'un dispositif de localisation indépendant à l'aide d'un émetteur ADS-B. Une première campagne d'essais fut menée à l'été 2017 à Saint-Yan pour débiter la qualification de cette nouvelle version, incluant la version opérationnelle de la fusée ICARUS (mais sans propulseur).

UTILISATION D'EOLE POUR LE PROJET ALTAIR

C'est finalement dans le cadre du volet expérimental du projet Européen ALTAIR qu'EOLE aura l'occasion de réaliser, pour la première fois, la mission principale pour laquelle il a été conçu, c'est-à-dire le largage. Ce volet expérimental fait intervenir 4 des partenaires du consortium ALTAIR : ONERA, CNES, GTD Sistemas de Información S.A. et Piaggio Aero Industries S.p.A.. Il inclut également la participation des PME Aviation Design (France) et LM Design (Luxembourg) et l'Université de Rennes 1 (France).

Ces essais sont focalisés sur le système embarqué du lanceur et la phase de séparation. Leur apport majeur réside dans la validation de la définition de ces deux éléments dans les conditions réelles du vol et avec la mise en oeuvre d'équipements.

Pour le système embarqué du lanceur, l'objectif des essais consiste à valider les stratégies et algorithmes d'initialisation des instruments de navigation avant la séparation, valider les performances du système de navigation et enfin valider les procédures et algorithmes pour la gestion automatique de la sauvegarde (sécurité du vol du lanceur vis à vis des biens et des personnes).

Pour la phase de séparation, l'objectif des essais consiste à valider le principe physique du système de séparation et valider la séquence complète de la manoeuvre de séparation.

Pour ces essais, le démonstrateur EOLE emporte une maquette à échelle réduite (échelle 1/13) du lanceur ALTAIR (Figure 7), laquelle est équipée d'un système embarqué représentatif de celui défini pour le lanceur ALTAIR échelle grandeur (Figure 8). La maquette de lanceur est accrochée sous EOLE via un système de séparation également représentatif de celui défini pour le porteur ALTAIR échelle grandeur (Figure 8). Enfin, les lois de navigation, guidage et pilotage permettant de reproduire une manoeuvre de séparation représentative de celle définie pour le système ALTAIR (Figure 9) sont implémentées dans l'autopilote du démonstrateur EOLE.



Figure 7 : Démonstrateur EOLE équipé de la maquette de
lanceur ALTAIR

LE LANCEMENT SPATIAL AÉROPORTÉ : DU CONCEPT À LA DÉMONSTRATION TECHNOLOGIQUE

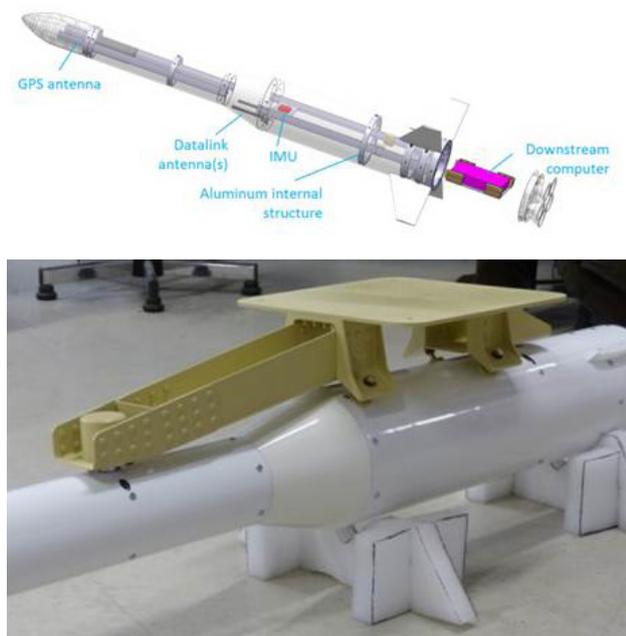
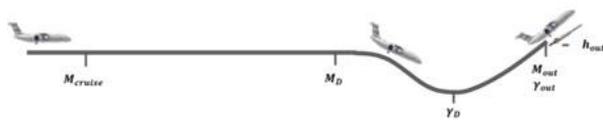


Figure 8 : Ecorché de la maquette de lanceur et accrochage au système de séparation



Conditions de vol de la séparation	ALTAIR	EOLE
Altitude : h_{out}	12000 m	1000 m
Mach : M_{out}	0.65	0.2
Pente : γ_{out}	20°	20°
Facteur de charge vertical: n_z	1.5 g	1.5 g

Figure 9 : Manœuvre de séparation ALTAIR et détail des conditions de la séparation

Le programme de vol est divisé en deux grandes phases, ou campagnes. Une première phase concerne la réalisation de vols à basses vitesses et altitude, dans des conditions en vue du télépilote. Cette campagne s'est tenue sur l'aéroport de Saint-Yan. Une seconde campagne porte sur la réalisation de vols à plus hautes vitesses et altitude, dans des conditions hors vue du télépilote, et allant jusqu'au largage de la maquette de lanceur. Cette campagne s'est tenue au Centre Spatial Guyanais de Kourou.

o Campagne à Saint-Yan

La campagne d'essais en vol à Saint-Yan a démarré en juillet 2018, mais a dû être interrompue pour problèmes techniques. Après leur résolution, les vols ont repris en 2019 pour deux sessions, respectivement en mai et juillet 2019.

La session de mai 2019 a comporté 3 vols dédiés aux tests du système embarqué de la maquette de lanceur. A cette occasion, 4 types de manœuvres ont été réalisés pour valider les stratégies et algorithmes d'initialisation des instruments de navigation de la maquette de lanceur, dans plusieurs conditions de vitesse : vol rectiligne, virage coordonné, Thach Weave et manœuvre de roulis. Ces tests ont été réalisés en simulant différentes conditions de fonctionnement du système embarqué du lanceur (dysfonctionnement de l'IMU, etc.). En plus des manœuvres d'initialisation, différents tests ont été menés afin de valider les procédures et algorithmes pour la gestion automatique de la sauvegarde. Pour cela, la zone survolée a été divisée en différentes catégories au regard des aspects sauvegarde (zone interdite, zone cible, etc.). Ainsi, chaque circuit combinait engagement de manœuvres d'initialisation et tests de sauvegarde (Figure 10). Enfin, toute la séquence relative à la manœuvre de séparation a été testée plusieurs fois. Pour se prémunir de tout risque de largage de la maquette de lanceur, le système de séparation était désarmé durant toutes les opérations réalisées sur l'aéroport de Saint-Yan.

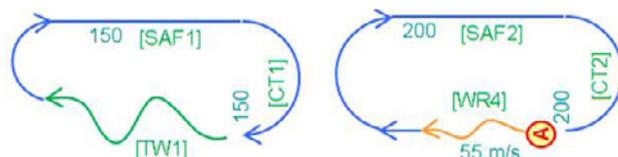


Figure 10 : Illustration de deux hippodromes combinant manœuvres d'initialisation (CTi, TWi, WRi) et tests de sauvegarde (SAFi)

Quant à elle, la session de juillet 2019 a consisté en 2 vols dédiés à la validation du bon fonctionnement du système expérimental pour la campagne suivante au Centre Spatial Guyanais, notamment avec les liaisons de données (télécommande et télémesure) à la puissance requise pour couvrir les vols hors vue.

o Campagne au Centre Spatial Guyanais

La campagne d'essais en vol au Centre Spatial Guyanais (CSG) de Kourou s'est déroulée du 26 août au 7 septembre 2019. La première semaine de la campagne a été entièrement dédiée à la mise au point des interfaces entre le système expérimental (EOLE équipé de la maquette de lanceur, station sol EOLE) et les moyens mis en oeuvre par le CSG pour assurer la réception des données de télémesure (antenne de réception et retransmission des informations vers la station sol EOLE) ainsi que leur traitement pour les besoins de sauvegarde (console dédiée assurant le respect des zones d'évolution autorisées). Les protocoles de gestion de la sécurité des opérations ont également été finalisés et testés.

ESPACE

LE LANCEMENT SPATIAL AÉROPORTÉ : DU CONCEPT À LA DÉMONSTRATION TECHNOLOGIQUE

Durant la seconde semaine, 3 vols ont été réalisés. Le premier vol s'est déroulé entièrement en vue du télépilote. Ensuite, le second vol a ouvert le domaine de vol du système expérimental dans des conditions de vol hors vue du télépilote : altitude maximale de 1000 m et distance maximale de l'ordre de 15 km (Figure 11). A la fin de ce vol, un test de la manoeuvre de séparation a été engagé (système de séparation désarmé). Enfin, le troisième et dernier vol a effectué une manoeuvre d'intialisation (Thach Weave avec 3 répétitions) suivie de la manoeuvre de séparation, avec activation du système de séparation. La séparation relative entre le démonstrateur EOLE et la maquette de lanceur s'est déroulée de façon nominale (Figure 12).

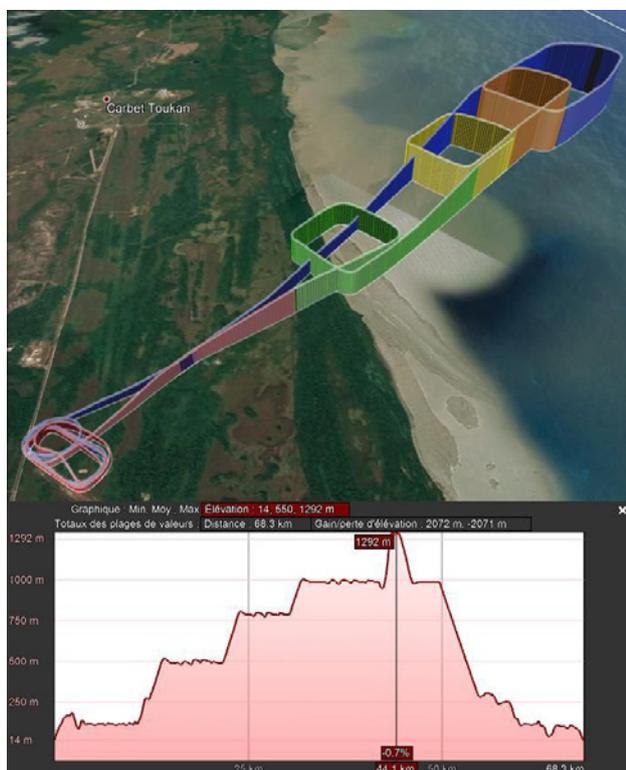


Figure 11 : Trajectoire et profil d'altitude du premier vol hors vue au CSG

Toutes les données collectées durant les campagnes à Saint-Yan et au Centre Spatial Guyanais sont actuellement en cours d'analyse et viendront nourrir la définition du système ALTAIR échelle grandeur.

Outre l'intérêt pour le projet ALTAIR et les études sur le lancement aéroporté, la campagne d'essai finale a constitué plus généralement une « première » pour le Centre Spatial Guyanais. C'était en effet la première fois qu'un véhicule automatique revenant au site de lancement y était opéré, dans le strict respect des procédures de sécurité et sauvegarde du site, comme pour n'importe quel lancement d'Ariane, Vega ou Soyouz. ■

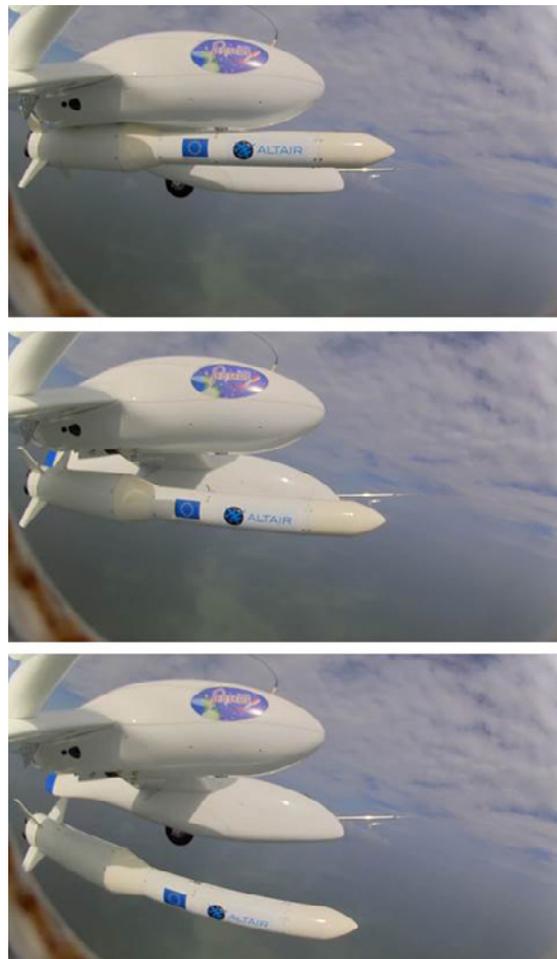


Figure 12 : Prises de vue embarquées du largage de la maquette de lanceur

RÉFÉRENCES :

1. Bérend N., J. Gauvrit-Ledogar et al. ALTAIR Semi-Reusable Air-Launch System-Current Design and Status of Flight Experiments. 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), 1-4 July 2019, Madrid, Spain.
2. Oswald, J., & Galeon, A. PERSEUS-European Space Research Program for Students. 22nd ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 7-12 July 2015, Tromsø, Norway (ESA SP-730, September 2015).
3. Ledogar, J., Hermetz, J., Sohier, H., Oswald, J., Rantet, E. EOLE, an innovative flying scale demonstrator for air-launch-to-orbit automatic systems. 28th Congress International Council of the Aeronautical Sciences, 23-28 September 2012, Brisbane, Australia.
4. Bertrand-Noël, V., Bignalet-Cazalet, F., Costantini, M. Flight safety concepts for EOLE. 10th International Association for the Advancement of Space Safety (IAASS), 15-17 May 2019, El Segundo - Los Angeles, USA.

ARTEMIS UNE DÉESSE EUROPÉENNE ? QUEL RÔLE POUR L'EUROPE DANS LE RETOUR AMÉRICAIN SUR LA LUNE ?

par Peter Weiss, COMEX

Peter WEISS est le Chef du Département Espace à la COMEX. Avant de rejoindre COMEX à Marseille M. WEISS a fait un doctorat en robotique spatiale à la Polytechnic University de Hong Kong où il a travaillé sur des systèmes d'échantillonnage lunaire et pour la mission Russe Phobos-Grunt. Il a également travaillé pour le DLR en Allemagne et le M.I.T. aux Etats-Unis sur la robotique spatiale. Au début de sa carrière il a travaillé pour Cybernetix dans la robotique sous-marine et le développement des robots autonomes d'exploration (AUV).

La société COMEX est un pionnier dans la plongée sous-marine et des technologies pour l'intervention humaine et robotisée dans des milieux extrêmes. COMEX est active dans des secteurs variés comme la robotique sous-marine, l'extraction minière offshore et les essais hyper et hypobares. Dans le secteur spatial COMEX cherche les synergies entre le monde spatial et sous-marin. La société soutient le Centre des Astronautes de l'ESA à Cologne avec une équipe de plongeurs, et elle est également impliquée dans des études et réalisations pour le spatial.

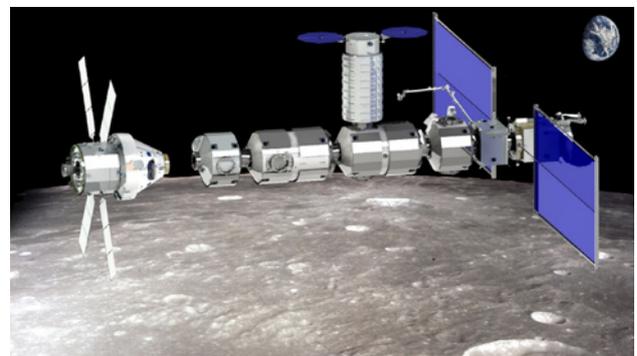
L'Europe est le continent des inventeurs et des explorateurs. A partir du XVI^e siècle, les scientifiques européens ont développé un grand nombre de machines, processus et objets que nous utilisons encore dans notre vie quotidienne. Dans la même période, les navigateurs, toujours européens, ont sillonné les océans de notre planète et l'ont cartographiée. L'Europe ne doit donc pas oublier son héritage d'explorateurs.

Les Etats-Unis d'Amérique remettent le cap sur la Lune, pour y renvoyer des astronautes. Le Programme ARTEMIS de la NASA prévoit de ramener des astronautes sur la surface lunaire dans les années 2024. En attendant cet alunissage, deux étapes intermédiaires sont prévues : ARTEMIS-1, où la capsule ORION orbitera autour de la Lune sans équipage en 2021, suivie en 2022 par ARTEMIS-2 avec un équipage de quatre astronautes. Ce sera donc la mission ARTEMIS-3 en 2024 qui fera retourner l'homme sur la surface lunaire, plus précisément au pôle sud. Il ne s'agit pas uniquement du retour de l'homme sur la Lune, car le gouvernement Trump a mis l'accent sur le fait qu'également une femme sera parmi ce premier équipage.

La nouvelle station spatiale GATEWAY fait partie de cette stratégie. GATEWAY servira de « camp de base » pour les excursions lunaires, assez similaire à un camp de base en montagne qui sert à se reposer avant une ascension. Depuis GATEWAY, les astronautes assisteront leurs collègues qui se trouvent sur la surface lunaire. Ils pourront piloter des robots pour explorer l'environnement et rechercher des ressources. Cette nouvelle station orbitale servira également de relais de télécommunication permettant d'établir un lien entre des instruments et des robots en surface, même sur la face cachée (en effet, actuellement, seule l'Agence Spatiale Chinoise a la capacité de communiquer avec la face cachée de la Lune grâce à son duo satellite-rover YUTU et QUEQIAO). GATEWAY sera beaucoup plus petite que les stations

spatiales en orbite terrestre ISS et MIR. Elle opérera dans un environnement bien différent de celui des stations d'orbite terrestre. En effet, localisée en orbite lunaire, elle ne sera pas protégée par la magnétosphère terrestre. Elle sera, de ce fait, pleinement exposée à des phénomènes et dangers liés à l'espace profond. Les niveaux de radiation sont plus élevés que ceux sur l'ISS, le plasma et le flux des matières ne sont pas atténués par l'environnement terrestre. GATEWAY permettra de développer des technologies et opérations nécessaires à des missions de longue durée dans ces conditions particulières. Dans ce cadre, vivre et travailler sur cette station permettra de préparer les astronautes pour des missions sur la surface lunaire, mais également pour des missions à destination de la planète Mars. Des instruments installés à l'extérieur de la station collecteront des données uniques.

Ainsi cette station GATEWAY devient le SAS pour des futures missions habitées et robotisées vers l'espace profond.



Le GATEWAY avant ARTEMIS (Image : COMEX, AIRBUS)

A ce jour, l'Europe fournit des éléments et fonctionnalités significatifs pour le développement de cette nouvelle station spatiale. Et ces développements et cette expertise peuvent également servir de contribution européenne

ESPACE

ARTEMIS UNE DÉESSE EUROPÉENNE ?

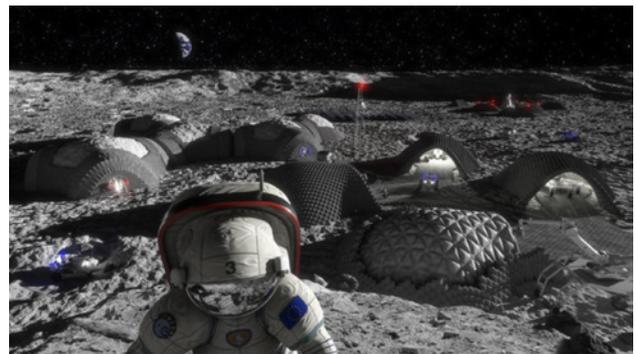
QUEL RÔLE POUR L'EUROPE DANS LE RETOUR AMÉRICAIN SUR LA LUNE ?

pour les futures missions ARTEMIS. Cependant, le rôle de l'Europe dans ce retour sur la surface lunaire n'est pas encore bien défini et un engagement fort des états-membres est indispensable pour s'assurer d'avoir un siège européen dans cette aventure et garantir qu'un spationaute européen sera le prochain à marcher sur la Lune après leurs collègues américains. L'Europe en tant que continent d'explorateurs mérite cette place !

La Chine, la Russie, l'Inde, toutes sont parties à la conquête de notre voisin céleste – le 8ème continent. Il est primordial que l'Europe joue aussi un rôle important dans cette nouvelle course. Une insuffisance budgétaire ne peut pas être une excuse pour une hésitation européenne dans cette initiative. En effet, des nations comme la République de l'Inde sont en train de mettre sur pied un programme de vols habités ambitieux – et ce avec un budget spatial bien inférieur à celui des agences Européennes. Il existe même des entreprises privées aux USA qui arrivent à mettre en place l'infrastructure nécessaire pour envoyer des astronautes dans l'ISS. L'Europe dispose de plus de ressources et d'expertises qu'une entreprise américaine, et une réflexion sur la stratégie industrielle européenne sera évidemment nécessaire : de nouvelles méthodes doivent être utilisées, des PME, start-ups et nouveaux arrivants dans le secteur spatial doivent être soutenus massivement sur le « Vieux Continent », pour entrer dans cette nouvelle course à l'Espace du Troisième Millénaire. Les futures missions n'auront pas pour objectifs de planter des drapeaux. Elles doivent permettre d'assurer une place et des ressources pour une variété de nouvelles industries européennes à venir. Elles doivent permettre d'inverser l'exode des cerveaux, cette fuite actuelle des chercheurs et ingénieurs vers les pays avec des objectifs spatiaux plus ambitieux. Elles doivent inspirer nos prochaines générations. Le secteur aérospatial est un des piliers de l'industrie française et européenne, nous n'avons pas le droit de rater ce lancement.

D'une façon un peu ironique, on pourrait dire que le programme Apollo était un « successful failure » : alors qu'il a mis fin à la course à l'espace dans le cadre de la Guerre Froide, Apollo n'a pas permis d'établir une présence humaine permanente sur la Lune. Cinquante ans après le premier pas de Neil Armstrong, seulement douze hommes ont marché sur la Lune. Le gouvernement du Président Donal Trump a établi un nouvel élan et une accélération dans cette course vers la surface lunaire avec le Programme ARTEMIS. L'Agence Spatiale Européenne et son Directeur Général Johann-Dietrich Wörner défendent depuis des années un retour durable sur la Lune. La seule façon d'éveiller l'intérêt de potentiels investisseurs dans une activité lunaire est d'amener divers acteurs de la société civile, des chercheurs et des industriels dans ces missions. Un retour sur la Lune ne

devrait pas être une activité d'une seule agence, et c'est ici que l'Europe peut ouvrir une voie. Pendant que les USA se préparent pour amener une américaine et un américain sur la Lune, l'Europe devrait travailler, en parallèle, en tant que partenaire, pour assurer une continuation durable des activités lunaires au-delà du premier alunissage d'ARTEMIS. Ceci peut être fait en construisant en Europe toute une nouvelle industrie focalisée sur des activités lunaires et en soutenant le programme ARTEMIS par des éléments qui peuvent aider à faire de ce retour sur la Lune la fondation pour une présence permanente. Les technologies d'habitation, la protection contre les radiations, les micrométéorites, la poussière, la robotique, l'astronautique et l'ISRU (in-situ ressource utilisation) doivent être développées et l'Europe doit apporter son expertise unique dans ce secteur. Ces nécessaires expertises et leurs installations d'essais ainsi que des démonstrateurs existent déjà en Europe pour traiter ces problèmes.



*Le Village Lunaire ; quel rôle pour Europe ?
(Image : LIQUIFER SYSTEM GROUP, REGOLIGTH)*

A l'heure où se profile une nouvelle course lunaire, limitée à des plantés de drapeaux, dans un contexte de changement des équilibres mondiaux, l'Europe se doit de montrer une voie alternative durable, scientifiquement, industriellement et socialement viable. Il est important que notre nation reste au premier rang de la science, de la technologie et de l'exploration. La décision de cette course vers de nouveaux objectifs sera bientôt prise ; l'avenir à long terme de notre continent sera décidé dans les mois à venir. L'Europe doit garder son esprit d'Explorateur. ■

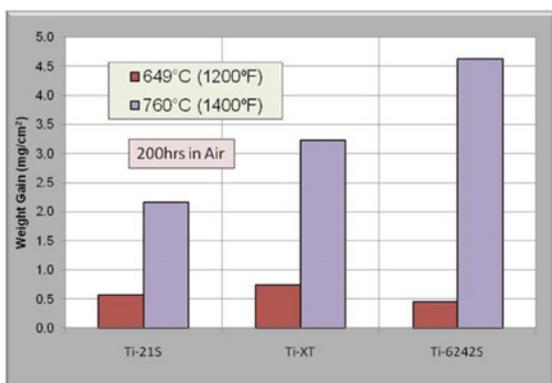
JOURNÉE THÉMATIQUE « TITANE À HAUTES TEMPÉRATURES » DU 15 MAI 2019 ORGANISÉE PAR LA COMMISSION TECHNIQUE MATÉRIAUX

par Anne Denquin, directrice du département Matériaux et Structure, ONERA

Le 15 mai 2019, la Commission technique Matériaux de 3AF a organisé une Journée Thématique sur les alliages de Titane pour applications Haute température sur le site d'Airbus à Saint-Éloi. La journée, qui a rassemblé une cinquantaine de participants, industriels comme académiques, avec de nombreux doctorants, a été organisée localement par Sylvie Gallet, responsable Matériaux de l'usine de Saint Eloi, centre d'expertise Métaux durs, dont les alliages de titane.

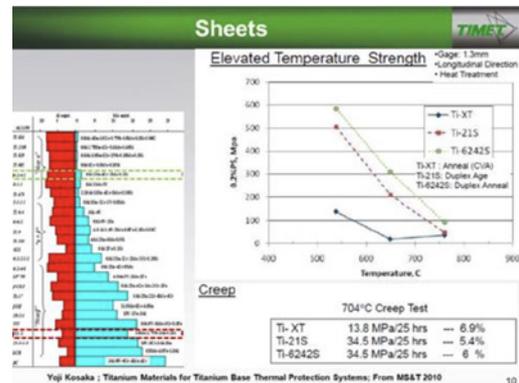
La matinée a été consacrée à des présentations scientifiques et techniques

1. Une revue « Développement des alliages de titane pour application haute température » sur des alliages existants pour les moteurs et les structures a été présentée par Yvon Millet (TIMET Savoie). Il apparaît que les alliages de base restent Ti6242, Ti 834 avec une application limitée vers 600°C. L'oxydation est le principal facteur limitant l'utilisation à plus haute température de cette catégorie d'alliages. Les aluminures de titane et les orthorhombiques restent une option étudiée pour l'augmentation des températures de service des matériaux présentant une densité plus faible que les superalliages base nickel.



Gain de masse apporté par les alliages de titane à haute température

2. L'« Effet d'un traitement mécanique sur la résistance à l'oxydation d'alliage de titane dans l'air à haute température » a été présenté par Luc Lavis (Laboratoire ICB, UMR 6303 CNRS/Université Bourgogne Franche-Comté) : le gradient de contrainte dans une pièce a une influence sur la diffusion de l'oxygène dans les alliages de titane. Il est montré que l'utilisation d'un traitement laser améliore la tenue à l'oxydation. Le rôle de l'azote en surface comme barrière à l'oxygène est discuté.



Resistance mécanique des alliages de titane à haute température

3. La « Maîtrise de l'oxydation des alliages de titane » a fait l'objet d'une présentation conjointe de Benjamin Dod (Airbus) et Daniel Monceau (CIRIMAT). La diffusion de l'oxygène dans les alliages de titane a des effets notables sur le comportement mécanique : on observe une augmentation du module apparent, une chute de la ductilité et une augmentation de la résistance mécanique. La fissuration de la couche oxydée peut présenter un effet d'entaille qui limite la ductilité. Il est montré que la couche d'oxyde et de diffusion a un fort impact sur la tenue en fatigue. Un modèle type Arrhenius a été développé pour simuler un cycle temps-température. La nécessité du couplage d'un modèle de diffusion avec des modèles de comportement en fatigue et en fluage devrait permettre de réduire le conservatisme actuel concernant le dimensionnement des pièces.

4. La modélisation de la diffusion de l'oxygène dans les alliages de titane a été présentée par Clara Desgranges (SafranTech) : un modèle de diffusion de l'oxygène a été développé en 1D. Celui-ci permet d'anticiper les évolutions de microstructures dans cette catégorie d'alliages. Il est montré que lorsque la matrice est sursaturée, l'oxyde peut alors croître assez vite.

5. Enfin, la simulation SPF des alliages de titane a fait l'objet de la présentation conjointe de Maxime Rollin et César Garnier (Airbus) : ce modèle a permis de raccourcir le temps de cycle SPF (divisé jusqu'à 3, mais 20 à 50% selon la géométrie de pièce). Le modèle inclut microstructure et contraintes résiduelles.

Après un excellent buffet, une visite des ateliers d'Airbus Saint-Éloi par petits groupes a permis de voir la partie SPF, usinage et construction des mats réacteurs. ■

SYNTHÈSE DE LA JOURNÉE SCIENTIFIQUE 3AF AMORTISSEMENT DES STRUCTURES AÉROSPATIALES : ENJEUX ET PERSPECTIVES

par Bernard Troclet, 3AF, membre de la Commission technique Structures

Cette journée du 28 novembre 2018, dédiée aux enjeux et perspectives de l'amortissement dans les structures aérospatiales, a été organisée en visio-conférence entre la salle Espace du CNES/Paris et la salle Léonard de Vinci du CNES/Toulouse par La Commission Structures de l'Association Aéronautique et Astronautique de France, la COMET Structures du CNES et le Département Matériaux et Structures de l'ONERA. Elle a réuni 110 personnes (70 à Paris et 40 à Toulouse).

L'amortissement, enjeu majeur de la conception des structures en dynamique basse fréquence, notamment dans l'industrie aérospatiale, reste la plupart du temps subi malgré un effort important de recherches. Cette journée se compose de 10 présentations et d'une table ronde, où le monde académique et les laboratoires (ENS Paris-Saclay, Ecole Centrale de Lyon, ONERA, Airbus, ArianeGroup, ThalesAleniaSpace, Hutchinson, Dassault Aviation, CEA) sont représentés. Les méthodes d'identification, de modélisation et d'amélioration de l'amortissement structural ont été discutées. La caractérisation et la modélisation de l'amortissement dans les liaisons a fait l'objet d'une considération particulière.

Le premier exposé (Prof. D. Néron de l'ENS Paris-Saclay) porte sur la prédiction de l'amortissement dans les liaisons des lanceurs spatiaux et l'étude de nouvelles solutions technologiques amortissantes. Les lanceurs disposent de nombreuses liaisons entre structures. Si l'amortissement intrinsèque des matériaux employés reste faible, l'amortissement apporté par les liaisons peut être important sous certaines conditions. Aussi des études ont été menées à ENS Paris-Saclay, avec le support du CNES et d'ArianeGroup, depuis de nombreuses années (2001), afin de comprendre les phénomènes dissipatifs dans les liaisons, de développer une approche virtuelle de construction d'une base de données et de proposer des solutions de liaisons amortissantes (Projet ANR ARIAN). Le calcul de l'amortissement dans les liaisons présente un certain nombre de difficultés : comportement fortement non-linéaire, valeur faible d'amortissement avec risque de pollution numérique, etc. L'ENS Paris-Saclay a développé une approche originale fondée sur LATIN et la décomposition de domaines (sous-structures et interfaces). Elle a été validée sur l'étage ESC-A d'Ariane 5 (voir Figure 1). La démarche a été appliquée à l'analyse de problèmes de contact avec un grand nombre de degrés de liberté et à l'étude de nouvelles liaisons avec interface viscoélastique (voir Figure 2).

La présentation suivante, intitulée « Modélisation et optimisation de l'amortissement structural induit par des pertes aux interfaces » par le Prof. Louis Jézéquel de l'Ecole Centrale de Lyon, aborde des outils simples permettant

de pré dimensionner la dissipation aux interfaces en s'appuyant sur les techniques de réduction de modèles. Elle rappelle les travaux réalisés dans ce domaine sur l'amortissement par glissement à partir des années 1981, par frottement avec Safran à partir de 1993 et le projet First Design à partir de 2002. Des outils de modélisation (modèle de Masing, réduction de modèles), les mécanismes de dissipation (frottement aux liaisons de 1er ordre et de 2ème ordre) et des outils de conception sont présentés.

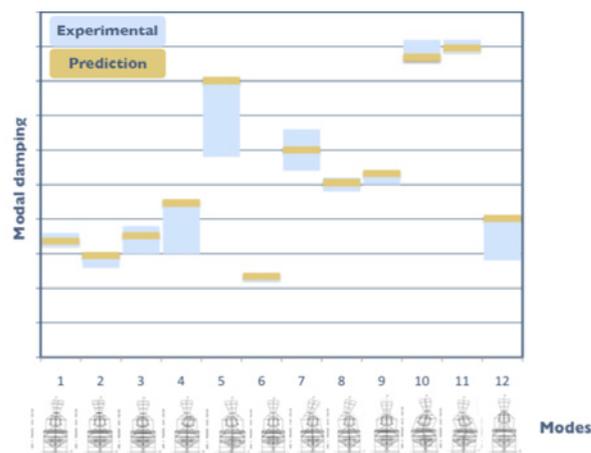


Figure 1 : Etage supérieur cryogénique d'Ariane 5
Comparaison des modes prédits et mesurés

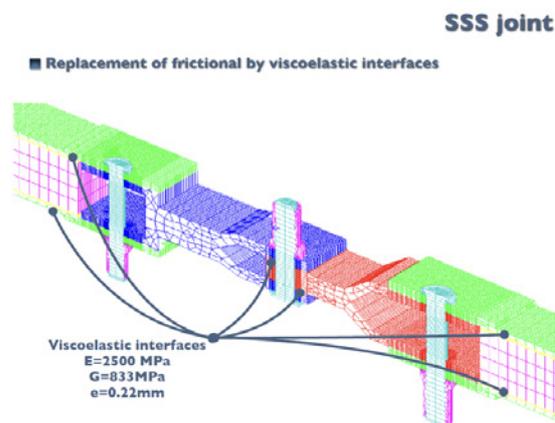


Figure 2 : Modélisation de la liaison SSS (Système de Séparation Sylva)

AMORTISSEMENT DES STRUCTURES AÉROSPATIALES : ENJEUX ET PERSPECTIVES

La présentation suivante de l'ONERA par Cyrille Stephan et Véronique Kehr-Candille intitulée « Modélisation et identification de l'amortissement dans les structures assemblées » revient sur les structures assemblées. Après une analyse physique du frottement par glissement (aspect méso et nano-méso) et sa formulation, la présentation développe la stratégie de modélisation des structures assemblées. Les liaisons étant complexes, elles sont modélisées par des méta-modèles prenant en compte les aspects dissipatifs et non linéaires de la liaison. Les structures connectées sont, quant à elles, modélisées par éléments finis. Différents méta-modèles sont présentés : Dahl, Bouc - Wen, Iwan - Jenkins, l'identification se faisant à partir du cycle d'hystérésis. L'écriture des équations régissant le comportement dynamique de l'ensemble des structures linéaires connectées par une liaison conduit à un système différentiel non linéaire dont la complexité est réduite par Craig-Bampton. La démarche a été appliquée à l'analyse de la réponse en dynamique d'une aube de Safran. Cette démarche très prometteuse permettra de concevoir des liaisons amortissantes.

L'exposé d'Airbus par Juan Loukota intitulé « L'effet des Éléments Non-Structuraux dans la Dynamique Globale Avion » concerne une thématique rencontrée dans de nombreuses structures aéronautiques, spatiales, navales, etc. Comment prendre en compte les éléments non structuraux telles que racks, panneaux acoustiques, sous-systèmes, câblage, etc. dans la dynamique du système (voir Figures 3 et 4).



Figure 3 : Structure principale d'un avion

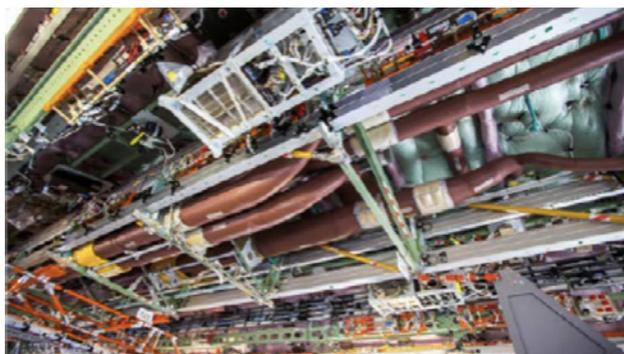


Figure 4 : Structure principale et éléments non structuraux

Cette thématique fait l'objet d'un grand nombre de communications, comme en témoigne cette présentation (voir C. Soize structures floues par exemple). L'exposé se focalise sur les moyennes fréquences, qui apparaissent dès 20 Hz dans le cas des gros porteurs. Le concept d'amortissement apparent dû aux éléments non structuraux dépendant de leur masse, position fréquentielle et amortissement est introduit dans une vision statistique. Sa détermination nécessite un modèle numérique fondé sur des travaux de B. Jedmundsen, (FRF based substructuring). Une validation expérimentale sur une pale d'hélicoptère a été réalisée et des résultats très satisfaisants obtenus. Bien évidemment, il est possible de s'appuyer, dans la conception des porteurs, sur les éléments non structuraux pour améliorer le confort en cabine.

La présentation de ThalesAleniaSpace par Gilles Carte « Tuned Mass Dampers for Space Applications » traite de la réduction des vibrations par résonateurs accordés. Elle concerne la réduction des vibrations au pied d'équipements sensibles de satellites, d'imagerie, d'interféromètres, et de communication. En effet, en ambiance spatiale, nous sommes confrontés à des amortissements très faibles, qui conduisent donc à de fortes amplifications dynamiques. Une solution, parmi de nombreuses, est le résonateur accordé. Après un rappel sur les performances du résonateur accordé, une application au satellite METEOSAT de troisième génération est présentée (support ESA et programme MTG), l'objectif étant de mettre en évidence sous quelles conditions (masse, facteur de surtension, amortissement) le comportement du résonateur accordé est optimal en termes de réduction des vibrations. Les essais réalisés ont conforté la théorie.

Une autre idée est de monter les équipements de satellite sur inserts amortissants. C'est le thème de la présentation d'Airbus Defence and Space de Patrick Camarasa intitulée « Damping inserts : a solution for vibration reduction ». Les inserts amortissants sont particulièrement attractifs, car ils réduisent les vibrations dues aux excitations sinus et aléatoires dans un large domaine fréquentiel d'une part, et n'induisent pas de modification de la conception structurale de la plateforme, ni de modification de son comportement modal d'autre part.

Airbus Defence and Space développe cette technologie (brevetée) depuis 2013, qui se compose de parties externe et interne en aluminium jointes par de l'élastomère (voir Figures 5 à 7). Ces dispositifs ont été testés à tous les types d'environnement rencontrés dans l'industrie spatiale : thermique, statique et dynamique, aléatoire, sinus et choc pyrotechnique.

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES
SYNTHÈSE DE LA JOURNÉE SCIENTIFIQUE 3AF
AMORTISSEMENT DES STRUCTURES AÉROSPATIALES : ENJEUX ET PERSPECTIVES

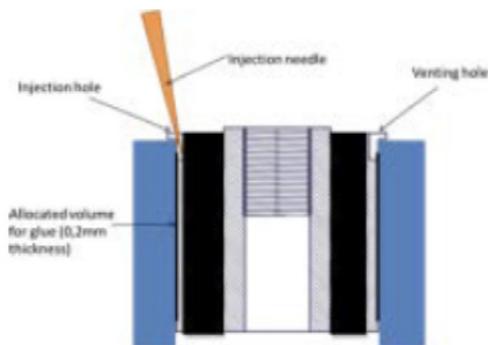


Figure 5 : Insert amortissant



Figure 6 : Insert vissé



Figure 7 : Insert collé

L'exposé suivant de Nicolas Marczak (ArianeGroup) « Analyse Modale en Opération. Application aux Lanceurs » porte sur l'utilisation de l'Analyse Modale en Opération (OMA). L'OMA a pour objectif la caractérisation des modes basses fréquences du lanceur Ariane 5 en vol, sans avoir une connaissance a priori des charges appliquées au lanceur, sous réserve qu'elles relèvent de bruits blancs et que les caractéristiques modales soient constantes par fenêtre temporelle. Le lanceur Ariane 5 est soumis au décollage et en vol à un grand nombre d'excitations mécaniques et aérodynamiques. Néanmoins, pendant la phase de vol EPC (Etage Principal Cryotechnique) seule la poussée du moteur Vulcain excite la structure. En conséquence, l'OMA a été appliquée dans cette phase de vol. Tous les vols Ariane 5 sont instrumentés et disposent en particulier de capteurs de vibrations longitudinales, qui ont été utilisés pour cette analyse. L'application de l'OMA a permis de caractériser les modes longitudinaux d'Ariane 5, en vol EPC, à partir des mesures lanceur et d'identifier les marges.

Vient ensuite un exposé dédié aux matériaux amortissants par Thierry Beauvilain (société Hutchinson), intitulé « Les matériaux amortissants pour améliorer le bruit intérieur cabine ». L'exposé se focalise sur trois matériaux : le Deltane 270, le Deltane 500 et le Deltane 350 et leur caractérisation afin de déterminer leurs propriétés en température, en fréquences et acoustiques. Des systèmes amortissants, plaques en contraintes avec matériaux viscoélastiques sont présentés.

L'exposé suivant est intitulé « Maîtrise de l'amortissement structural pour le confort acoustique interne des Falcons » et est présenté par Yann Revalor de Dassault Aviation. Il présente la stratégie de Dassault Aviation en termes d'amortissement structural et de réduction des vibrations par suspension. Un point particulier est fait sur le traitement des instabilités.

Le dernier exposé de la journée intitulé « Le rôle de l'amortissement dans l'isolation sismique » par Ioannis Politopoulos du CEA s'intéresse à l'isolation sismique des centrales nucléaires. La conception des centrales nucléaires doit prendre en compte des séismes à forte amplitude avec un contenu très basse fréquence et les équipements doivent conserver un fonctionnement satisfaisant. Des systèmes d'isolation à la base sont ainsi présentés et discutés :

- Suspensions à faible et fort amortissement LDRB et HDBR, respectivement Low Damping Rubber Bearing et High Damping Rubber Bearing.
- Suspension LDRB en parallèle avec un élément de Maxwell, souvent utilisé en isolation vibratoire pour améliorer la transmissibilité à haute fréquence, mais peu en isolation sismique.
- Eléments de relaxation : LDRB en parallèle avec un élément de Maxwell contenant un fluide viscoélastique. Cet élément constitue un dispositif d'isolation mixte passif/semi actif.
- Solution d'amortissement à la base du bâtiment à masse accordée Tuned Mass Damper ou TMD.

Cette journée, particulièrement riche par les exposés et les discussions, s'est terminée par une table ronde animée par le Prof. Pierre Ladevèze (ENS Paris-Saclay). Les connaissances et pratiques ont évolué ces dernières années : développement d'outils pour modéliser et designer l'amortissement bien que son optimisation sous contraintes reste embryonnaire, prise en compte des variabilités (câblage, etc.). On arrive à développer des solutions d'amortissement performantes, mais leur robustesse reste une difficulté (sensibilité aux processus de fabrication, comportement au temps, etc.). De même, l'évolution de l'amortissement en fonction des charges est un domaine d'intérêt (méconnaissance de cette évolution pouvant conduire à des surdimensionnements). Et enfin nous pouvons nous poser la question de l'apport de l'additif dans la conception de l'amortissement. ■

PARAMÉTRISATION DES FORMES ET CALCUL DE GRADIENT EN SIMULATION AÉRODYNAMIQUE

par Jacques Peter et Antoine Dumont, ONERA, membres d'Alumni-ONERA

Les performances aérodynamiques des avions, de leurs moteurs, des hélicoptères, etc, sont des facteurs déterminants de leur succès économique, si bien que les formes de ces dispositifs aéronautiques sont très précisément optimisées ; notamment à l'aide de simulations numériques. En pratique, sur un espace de formes paramétrées admissibles, on recherche celle minimisant une fonction objectif (typiquement la traînée d'un avion, le rendement d'un étage de turbomachine) tout en respectant des contraintes (typiquement, portance et moment de tangage inchangés pour une aile, débit et taux de compression contraints pour un rotor-stator). Lorsque l'optimum est cherché sur tout l'espace de formes, on parle d'optimisation globale ; lorsqu'il est recherché sur le voisinage d'une forme initiale, on parle d'optimisation locale. Une optimisation locale peut être conduite par deux types d'approche : les méthodes de motifs qui calculent les valeurs des fonctions d'intérêt aux sommets d'une figure géométrique dans l'espace de conception puis déplacent et réduisent cette figure en direction d'un minimum local (la plus connue est la méthode du simplexe) ; les méthodes de descente qui utilisent le gradient des fonctions d'intérêt par rapport aux paramètres de forme pour déterminer une direction adéquate de descente (la méthode des directions admissibles est une méthode classique de ce type).

L'intérêt technique des optimisations locales de forme par méthode de descente s'est avéré considérable et la lettre de la 3AF y consacra un article dans un prochain numéro. Dans le présent document, à titre d'introduction à cette synthèse, on présente les principes du calcul de gradient discret (abréviation usuelle de gradient discret des fonctions d'intérêt par rapport aux paramètres de forme) mis en œuvre à l'ONERA depuis 2002, notamment dans le grand code de simulation aérodynamique elsA et les méthodes usuelles de paramétrisation des formes aéronautiques. On discute notamment brièvement certains aspects mathématiques et informatiques.

CALCUL DE GRADIENT POUR L'OPTIMISATION DE FORME

Une méthode de simulation usuelle « volumes finis » calcule la moyenne spatiale du champ aérodynamique dans les cellules d'un maillage de la zone fluide (voir figure 1 un exemple de maillage en deux blocs et 396.216 cellules autour de l'aile AS28G). Ce maillage X étant fixé, d'un point de vue mathématique, la simulation aérodynamique stationnaire précédant le calcul de gradient revient à

résoudre un système d'équations non linéaires $R(W, X) = 0$ où R est une discrétisation consistante des équations de la mécanique des fluides intégrées sur les cellules du maillage et le champ aérodynamique discrétisé, W , un vecteur de la même taille que R (nombre de cellules du maillage fois nombre d'équations du modèle de mécanique des fluides). Si on note n_w cette taille commune, pour la maillage 3D de la figure 1, $n_w = 5 \times 393216$). La résolution du problème non linéaire $R(W, X) = 0$ est faite par une méthode itérative faisant généralement intervenir la matrice jacobienne $\partial R / \partial W$ sous forme exacte ou approchée.

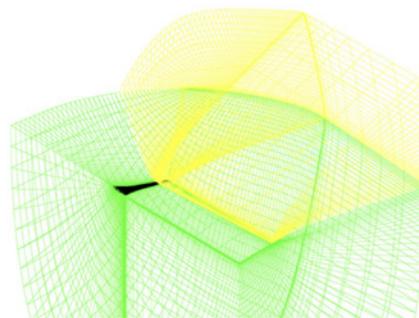


Figure 1 : Vue partielle d'un maillage en deux blocs autour de l'aile AS28G

Pour passer de la simulation aérodynamique stationnaire autour d'une forme solide fixe à un problème d'optimisation de forme et de calcul de gradient, il faut considérer désormais que la forme solide est fonction d'un vecteur de paramètre de forme α de taille n_α (soit directement, soit via une fonction de déformation). Au niveau de la simulation numérique, cela revient à considérer une famille paramétrée de maillages volumiques $X(\alpha)$ qu'on supposera toujours de classe C^1 au moins. Se pose alors cette question : sous quelles conditions mathématiques peut-on rigoureusement déduire des équations des écoulements convergés sur l'espace de paramètres -- $\forall \alpha R(W, X(\alpha)) = 0$ -- le fait que l'écoulement discret W soit une fonction du maillage et, par composition, du vecteur de paramètres de forme α ? Cette question renvoie les ingénieurs à leurs souvenirs du théorème des fonctions implicites, généralement appris et illustré dans le cas où l'on exprime une variable réelle en fonction d'une autre à partir d'une identité dans \mathbb{R}^2 . Ce théorème est cependant beaucoup plus général et s'applique, pour le problème ci-dessus, sur un voisinage d'un couple écoulement discret - maillage (W_i, X_i) tel que $R(W_i, X_i) = 0$, $\det(\partial R / \partial W)(W_i, X_i) \neq 0$. Sur ce voisinage, l'écoulement discret est une fonction du maillage et par suite des paramètres de

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

PARAMÉTRISATION DES FORMES ET CALCUL DE GRADIENT EN SIMULATION AÉRODYNAMIQUE

forme et tout degré de régularité commun à $R(W, X)$ et $X(\alpha)$ se transmet à $W(\alpha)$.

Le problème d'optimisation locale par méthode de descente est formulé comme la minimisation d'une fonction objectif sous un ensemble de contraintes. Pour réaliser la minimisation, on veut disposer des dérivées de l'ensemble de ces fonctions :

$$dJ_k/d\alpha_i, i \in [1, n_a] \quad k \in [1, n_f] \quad (1)$$

qui s'expriment chacune en fonction du champ aérodynamique et du maillage $J_i(\alpha) = J_i(W(\alpha), X(\alpha))$. Le calcul de ces dérivées n'est pas direct puisque $W(\alpha)$ est une fonction implicite définie, sous les hypothèses rappelées précédemment, par la condition de convergence des simulations numériques.

Une fois établi ce cadre mathématique, on définit une première méthode dite directe ou de différentiation directe, qui résout autant de systèmes linéaires (de la taille du problème de simulation d'écoulement, n_w) qu'il y a de paramètres de forme pour calculer la variation de l'écoulement sous l'effet de ces paramètres, $dW/d\alpha_i$. Il est ensuite aisé d'assembler les différents termes de (1), les dérivées des fonctions d'intérêt par rapport aux paramètres de forme. Pour les problèmes d'optimisation locale de forme, en particulier en aérodynamique externe, le nombre de fonctions à dériver est généralement très inférieur au nombre de paramètres de forme et il serait très favorable de disposer d'une méthode dont le coût soit proportionnel au nombre de fonctions, n_f , et pas au nombre de paramètres de forme, n_a . Il existe plusieurs manières de dériver les équations de cette méthode appelée méthode adjointe. Pour comprendre ce qui rend possible cette dérivation adjointe avec un coût peu intuitif, le lecteur peut se pencher sur le petit problème d'algèbre linéaire suivant :

$$\text{Calculer } S_i = (A^{-1}u_i, f) \quad (f, u_i) \in R^p \quad A \in M(R^p) \quad i \in [1, n_a]$$

et se convaincre qu'il est plus efficace de résoudre un seul système linéaire de matrice A^T que n_a système linéaire en la matrice A . En effet, si $t = A^{-T}f$, alors les S_i se calculent simplement par les produits scalaire $S_i = (u_i, t)$.

Le calcul de ces dérivées des fonctions d'intérêt par rapport à des paramètres de forme en vue de l'optimisation de forme est devenu, durant les années 2000, une capacité standard, sinon obligatoire, des grands codes de simulation aérodynamique. Les modules de calcul de gradient codant les méthodes directe et adjointe représentent aujourd'hui une partie significative des lignes d'un grand code de simulation, même si une partie seulement des discrétisations proposées pour le calcul d'analyse est

différentiée. Ces modules résolvent généralement les systèmes linéaires en la matrice jacobienne du schéma numérique (méthode directe) ou sa transposée (méthode adjointe) par des méthodes de gradient conjugué ou de relaxation où la jacobienne du schéma n'intervient que dans des produits matrices fois vecteur colonne et vecteur ligne fois matrice. Le codage de ces deux opérations :

$$\left(\frac{\partial R}{\partial W} \right) \times C \quad \text{et} \quad L \times \left(\frac{\partial R}{\partial W} \right) \quad (2)$$

peut être largement simplifié par des outils de différentiation automatique qui, partant du code source de calcul du résidu R , produisent le code source correspondant aux opérations (2). C'est aujourd'hui un enjeu important lors de la conception d'un nouvel outil de simulation aérodynamique de prévoir un codage de l'évaluation de R permettant d'obtenir le plus simplement et le plus généralement possible le code des opérations dérivées (2).

Méthodes de paramétrisation usuelles des formes aérodynamiques

De manière classique, la paramétrisation s'applique naturellement à la forme solide et la déformation du maillage surfacique de l'objet aéronautique (noté $X_s(\alpha)$) est propagée à l'ensemble du maillage du fluide noté $X(\alpha)$ précédemment).

Paramétrisation des objets aéronautiques. La paramétrisation géométrique des profils d'aile et des aubes de turbomachines s'appuie, soit sur les notions aérodynamiques usuelles (épaisseur, cambrure...) du dispositif, soit sur une description mathématique de la variation géométrique que l'on fait subir à l'objet.

Paramétrisation aérodynamique métier. Un profil à vocation aérodynamique (d'aile, d'aube de turbomachine, de pale d'hélicoptère) est caractérisé par un ensemble de grandeurs directement liées, pour l'aérodynamicien, à ses performances : loi d'épaisseur, loi de cambrure, rayon de bord d'attaque, épaisseur de bord de fuite, etc. La variation de ces paramètres est une manière simple (et pour le spécialiste intuitive) de piloter la variation du profil. Ce procédé s'étend aux formes correspondantes tridimensionnelles - ailes, aubes, pales d'hélicoptère ou d'hélice - en caractérisant l'empilement selon l'envergure ou la hauteur de veine. Les lois dites de vrillages, de dièdre, de flèche, complètent la géométrie des profils pour définir la forme tridimensionnelle. De nouveau, cette description géométrique métier peut être directement utilisée pour piloter des variations de forme.

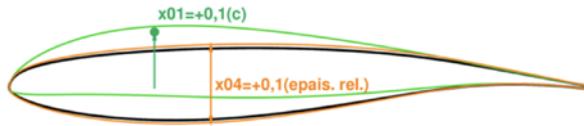


Figure 2 : Effet d'un paramètre de cambrure à 25% de corde et d'un paramètre d'épaisseur sur un profil RAE2822

Paramétrisation mathématique. Les paramétrisations mathématiques servent généralement à définir les variations de la forme solide (d'un point de vue numérique, du maillage $X_s(\alpha)$) envisagées pour l'optimisation. Il est plus difficile de prévoir leur effet aérodynamique. Plusieurs types de fonctions mathématiques permettent une déformation locale de la paroi solide ; la combinaison d'un ensemble de « bosses » paramétrées permet une variation de l'objet solide sur une grande partie de sa surface. Les bosses de Hicks-Henne, les splines, les réseaux denses dits de *free-form* sont des exemples classiques de cette famille nombreuse de fonctions de déformation à support limité. Ces fonctions trouvent un intérêt particulier dans la paramétrisation des déformations de zones n'ayant pas de caractérisation géométrico-aérodynamique naturelle, comme le ventre mou d'un avion, le raccord aile-fuselage ou la « niche à chien » d'un hélicoptère.

Déformation régulière du maillage volumique. Une fois défini le maillage de l'objet solide en fonction des paramètres de forme $X_s(\alpha)$, il est nécessaire de calculer un maillage volumique correspondant, $X(\alpha)$, avec de bonnes propriétés de régularité notamment au voisinage de la paroi. Cette opération est réalisée à partir des maillages $X_s(0)$, $X(0)$ (maillage initiaux de peau et de volume) et du maillage déformé de surface $X_s(\alpha)$. Trois types de méthodes sont mises en œuvre à l'ONERA pour cette opération : les méthodes d'analogie mécanique résolvent un problème d'élasticité simplifié dans le domaine fluide soumis à la déformation forcée de la paroi ; les méthodes intégrales reportent en chaque nœud du domaine fluide une fraction de la déformation des points de la peau (en fonction du vecteur qui les relie) ; la méthode des quaternions. ■

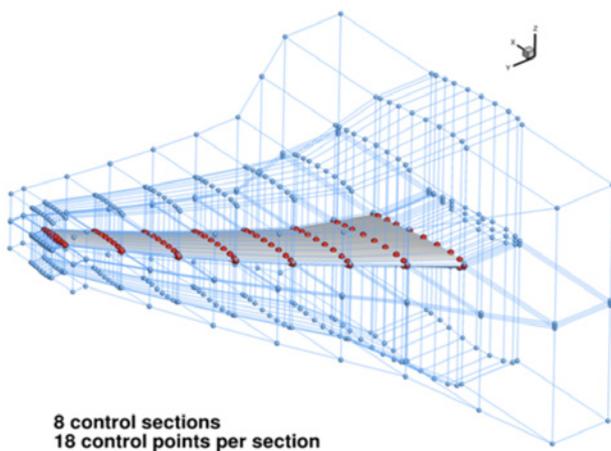


Figure 3 : variations de forme paramétrées par réseau *free-form* sur une aile CRM

LE BRUIT DES AVIONS

par Denis Gély, Expert acoustique aéronautique de l'ONERA, membre sénior 3AF

Le 2 juillet 2019, Denis Gély donnait une conférence sur le bruit des avions à la mairie du XV^e arrondissement de Paris dans le cadre des activités organisées par le groupe Ile-de-France de la 3AF. Cet article reprend le fil de cette conférence fort appréciée des auditeurs

La réduction des nuisances sonores et des émissions polluantes sont des enjeux environnementaux majeurs pour le transport aérien. Concernant la réduction du bruit des avions, les industriels et les établissements de recherche ont contribué ensemble, depuis les années 1960, à des progrès technologiques qui ont permis de réduire considérablement le bruit à la source émis par les avions. Toutefois, le trafic aérien étant en forte croissance ininterrompue sur la même période, les nuisances sonores autour des aéroports restent une problématique majeure pour le transport aérien.

CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) élabore les normes internationales applicables aux avions de transport civils. Compte tenu des délais nécessaires à la conception, à la fabrication et à la mise en service d'un nouvel avion, l'objectif de cette instance internationale est de promouvoir une nécessaire évolution des règles permettant aux constructeurs d'améliorer (et surtout ne pas dégrader) la situation des riverains d'aéroports. Dans les années 50, les avions de première génération à grande capacité de transport de passagers tels que le Boeing 707 et le DC8 étaient Sans Certification Acoustique (SCA). Au début des années 1960 la première norme édictée par l'OACI apparaît avec le chapitre 2 de l'Annexe 16 - Volume 1. Ainsi les avions tels que Boeing727, DC9 et Caravelle sont soumis au respect de niveaux acoustiques à ne pas dépasser suivant les configurations de vols. L'unité utilisée, EPNdB (Effective Perceived Noise exprimé en décibels), tient compte de la durée d'exposition au bruit au cours de la phase de survol. Depuis plus de 5 décennies, l'évolution des normes en matière de certification acoustique n'a cessé d'être de plus en plus contraignante (chapitre 3 en 1977, chapitre 4 en 2001) comme le montre la figure 1. Le chapitre 14 actuellement en vigueur est applicable depuis décembre 2017.

Au sein de l'OACI, le CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection) organise régulièrement des revues technologiques avec tous les industriels du secteur aéronautique, en présence des instances étatiques et d'experts indépendants, pour évaluer la maturation des nouvelles technologies et pour fixer des objectifs d'amélioration à court, moyen et long terme. La Commission européenne a émis une directive concernant le bruit des avions. Elle vise à mettre en œuvre la politique d'approche équilibrée prônée par l'OACI pour harmoniser le processus d'établissement des normes à l'intérieur de

l'Union européenne. En 2000, l'ACARE (Advisory Council for Aeronautical Research in Europe) fut créé pour rassembler tous les intervenants européens du secteur aéronautique. Cette instance de réflexion a rapidement édité un Agenda de Recherche Stratégique (SRA) en incluant les conclusions du rapport Vision 2020, en précisant les moyens à mettre en œuvre et en chiffrant des objectifs ambitieux pour l'horizon 2020 :

- réduire le bruit perçu de 10 EPNdB par opération,
- contenir les nuisances sonores dans le périmètre de l'aéroport,
- maintenir le leadership technologique européen.

A plus long terme, le nouvel objectif à l'horizon 2050 est réduire le bruit perçu de 15 EPNdB par opération (référence année 2000).

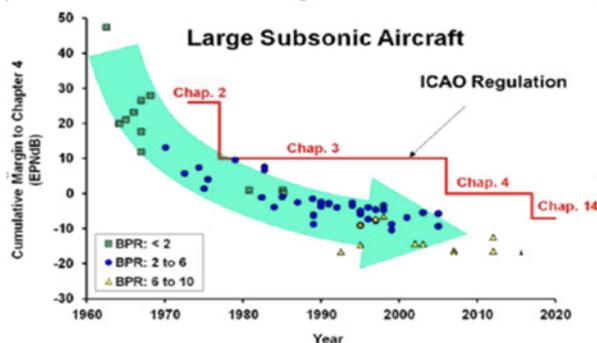


Figure 1 : Evolution des normes OACI pour la certification acoustique des avions

LA RÉDUCTION DU BRUIT DES AVIONS

Les sources de bruit au niveau de l'avion sont nombreuses, complexes par nature et différentes suivant les phases de vol au décollage et à l'atterrissage. Pour réduire le bruit à l'émission, il convient de les recenser, de les identifier et de les caractériser afin de cibler les stratégies de développement des nouvelles technologies. Parmi les sources les plus énergétiques, les deux principales sont **la motorisation et le bruit d'origine aérodynamique**.

Du côté de la propulsion, les moteurs à double-flux (turbofan), sont composés d'un ensemble complexe d'éléments : la soufflante, le compresseur, les étages de turbine, la chambre de combustion et les jets primaire et secondaire à l'éjection. Chaque source élémentaire rayonne suivant des caractéristiques propres en fréquence et en directivité (Figure 2).

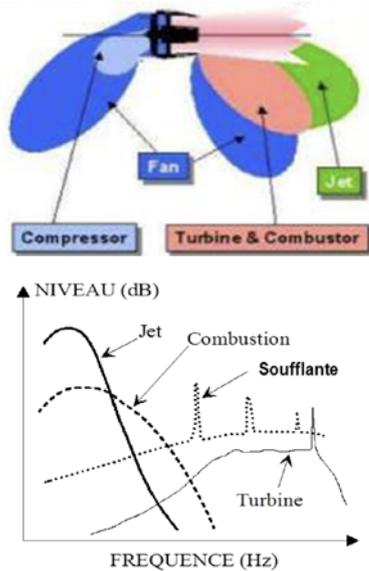


Figure 2 : Caractéristiques en directivité et en fréquence des sources élémentaires d'un moteur double-flux

Par ailleurs, l'intensité acoustique absolue et relative des différentes sources qui contribuent au rayonnement global changent suivant la phase de vol au décollage ou à l'atterrissage comme le montre la figure 3.

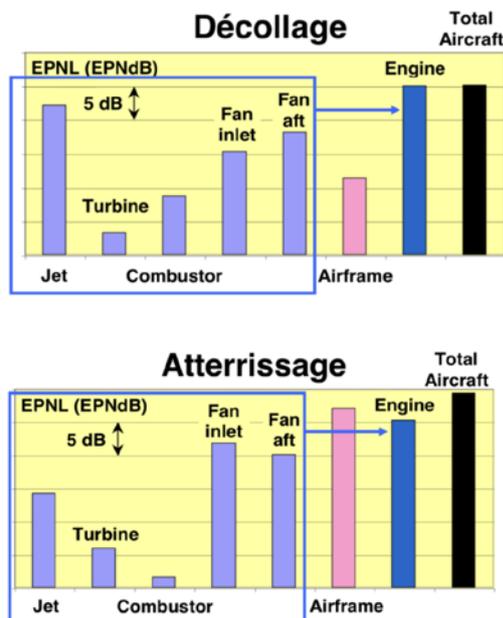


Figure 3 : Contribution des sources sonores d'un avion en phase de décollage et d'atterrissage

Ainsi on peut remarquer sur l'exemple illustré figure 3 que la source dominante au décollage est due, comme on peut s'en douter, à la propulsion car les moteurs sont à pleine puissance. En revanche, en phase d'approche, le

bruit global aérodynamique est désormais le plus souvent du même ordre que celui produit par les moteurs. Il peut même être prépondérant pour les très gros porteurs comme l'A380 : d'une part, les moteurs à nouvelle technologie sont particulièrement silencieux à bas régime et, d'autre part, les trains d'atterrissage hypertrophiés en taille et nombre de roues sont générateurs de bruit plus important. Le bilan reste néanmoins positif et on peut se souvenir que le «Décibel d'Or» a été attribué, il y a une dizaine d'années, à l'avionneur européen Airbus pour sa technologie Zero-Splice concernant les liners implémentés sur les nacelles des moteurs de l'A380. La réduction du bruit de la soufflante atteint jusqu'à 7 décibels.

Si l'on remonte dans l'histoire du combat des acousticiens contre les décibels d'origine aéronautique, il faut rappeler que, dans les années 1970, les moteurs à double-flux furent à l'origine d'une diminution remarquable du niveau sonore produit par le système propulsif. Le flux primaire ou flux chaud traverse tout le réacteur en passant par les compresseurs, la chambre de combustion et les turbines. Le flux secondaire, ou flux froid, contourne, quant à lui, toute la partie chaude du réacteur. La grande quantité d'air du flux secondaire qui entoure ainsi le flux primaire se comporte comme un gainage aérodynamique du flux chaud, réduisant les gradients de température et de vitesse et limitant conséquemment la turbulence à l'origine du bruit de jet. L'optimisation de cette technologie a duré plusieurs décennies ce qui a conduit à une réduction très importante du bruit à l'éjection. Comme le montre la figure 1, les taux de dilution (BPR ByPass Ratio) n'ont cessé d'être augmentés pour bénéficier de réductions de bruit de jet de plus en plus efficaces. Evidemment, traiter la source dominante du bruit fait émerger des sources secondaires qui étaient présentes mais masquées en niveau relatif pour les moteurs à faible BPR, comme le bruit de turbine ou de combustion (Figure 4).

Actuellement, le BPR est de l'ordre de 10 à 12 (débit massique du secondaire 10 fois celui du primaire) et les nouvelles générations de moteur en conception (UHBR Ultra High BPR) visent des taux de dilution de 14 et plus. Le diamètre des moteurs étant en grande partie fonction du BPR, le concept UHBR trouvera certainement une limite à moyen terme. La soufflante qui produit le flux secondaire, de fort diamètre, engendre avec ses parties tournantes un bruit de nature différente en aval et en amont, notamment dans les phases d'approche lorsque la vitesse du jet est réduite. Un grand nombre d'études portent désormais sur la conception de soufflantes plus silencieuses en optimisant les bords d'attaque et de fuite des aubes du rotor, en adaptant la forme et la position du stator et, plus récemment, en développant des concepts de contrôle actif. Enfin, la réduction du bruit des moteurs est également obtenue par la mise en place de matériaux

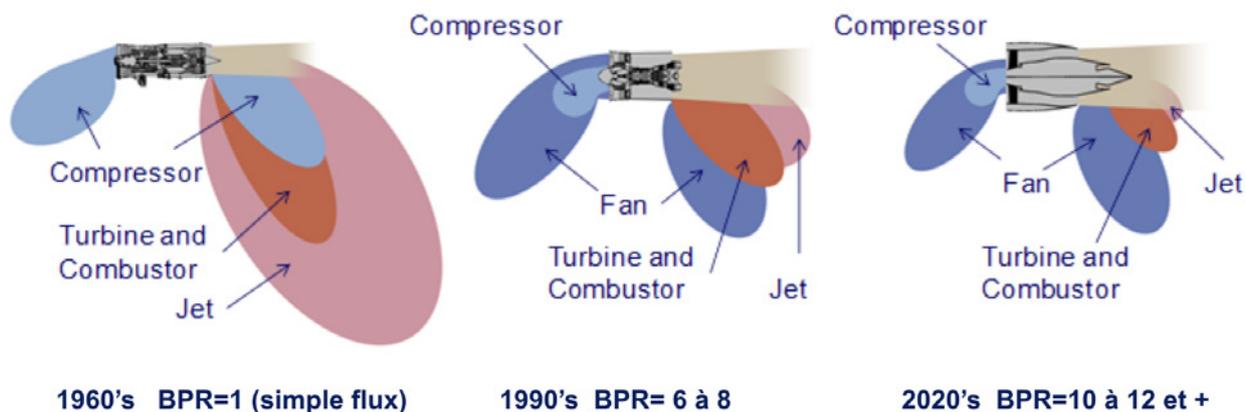


Figure 4 : Evolution de la contribution relative des sources sonores d'un moteur en 60 ans

absorbants acoustiques dans la nacelle. Les études visent à améliorer l'efficacité des traitements (Liners) par une meilleure compréhension et par une optimisation du fonctionnement des absorbants en présence d'écoulement. Compte tenu des surfaces importantes à traiter dans la nacelle et des réductions de bruit potentiellement observées, ces dispositifs sont de plus en plus mis en œuvre (le cas de l'A380 précité est un parfait exemple).

Concernant le bruit aérodynamique (airframe noise), il est produit par la turbulence qui prend naissance à chaque interaction entre les écoulements et les surfaces ou les équipements tels que les trains d'atterrissage, les becs, les volets, les bords d'attaque et de fuite des profils, la cellule de l'avion et les cavités (Figure 5).

Les techniques de réduction de bruit diffèrent suivant la nature du bruit aérodynamique et son origine.



Figure 5 : Sources de bruit d'origine aérodynamique

Les éléments constitutifs d'un train d'atterrissage sont très nombreux comme le montre la figure 6a. Pour limiter l'émission acoustique produite par certains éléments, il est possible de placer un carénage qui va limiter les interactions entre l'écoulement et les sous-ensembles restant fixes après le déploiement, comme les barres directionnelles, le transmetteur de couple, les dispositifs hydrauliques de commande et autres appendices (voir Figure 6b).

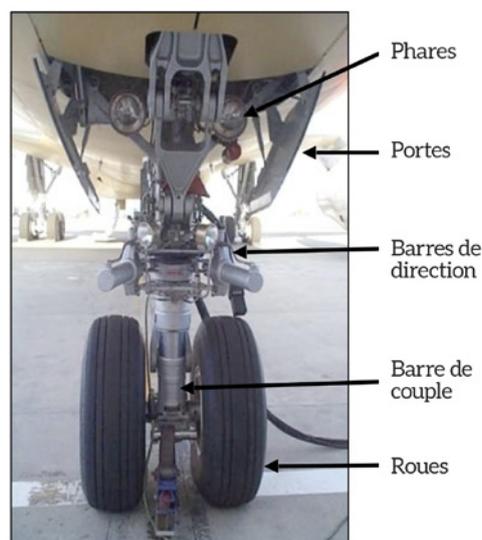


Figure 6a : Train et sous-ensembles

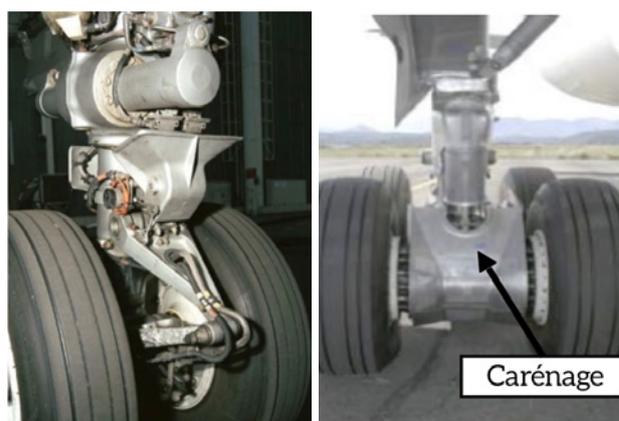


Figure 6b : Traitement du bruit de train d'atterrissage

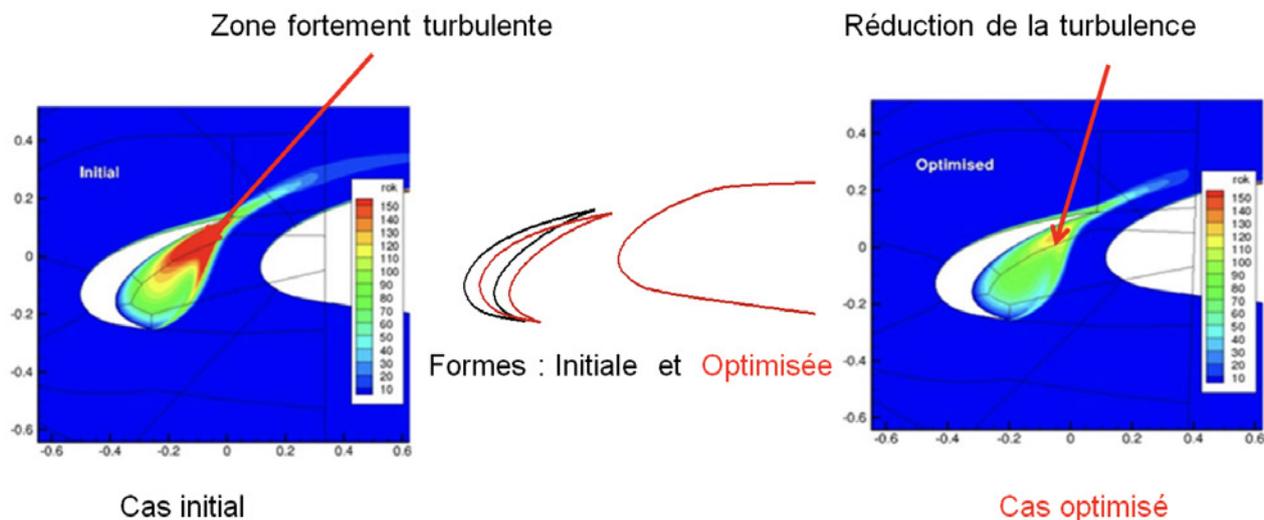


Figure 7 : Optimisation acoustique par calcul d'un profil hyper-sustenté (cavité bec-profil)

Pour le bruit de bec et de cavité, on s'attache à optimiser, en forme et en volume, la cavité entre le profil d'aile et le bec lorsque ce dernier se déploie. Le but est de limiter la création de turbulence en tenant compte de critères acoustiques et aérodynamiques car la performance en termes de portance doit être préservée, voire améliorée. La figure 7 illustre l'optimisation de la position relative bec-profil par simulation numérique. Le niveau de turbulence dans la cavité du bec est nettement atténué conduisant à une réduction du bruit d'environ 70 %, réduction associée à une légère augmentation du coefficient de portance de l'ordre de 1 %, deux bénéfices issus de l'optimisation multidisciplinaire.

Par ailleurs, au chapitre des dispositions de nature à limiter le rayonnement acoustique, on peut noter que l'installation des moteurs au-dessus de la voilure ou au voisinage de l'empennage est une solution envisagée dans le cadre de nouveaux programmes pour bénéficier d'effets de diffraction et de masquage des ondes acoustiques.

LES OUTILS DE DIAGNOSTICS ET D'OPTIMISATION

La panoplie des outils à la disposition des aéroacousticiens est très vaste et couvre les approches expérimentales et les simulations numériques.

Les essais sont réalisés en banc statique ou en soufflerie anéchoïque. Dans le cadre de recherches, ils portent sur des éléments isolés et, le plus souvent, sur des maquettes à échelle réduite. Dans l'accompagnement de projets industriels, les essais visent à caractériser des systèmes complets à plus grande échelle ou à l'échelle 1. Les essais en vol, plus coûteux et réservés à des phases de développement pour lesquelles la maturation technologique est aboutie, sont utilisés systématiquement pour la certification acoustique de l'avion. Sur le plan des techniques de

mesure, l'imagerie acoustique apporte de précieuses informations pour la localisation, la caractérisation et la hiérarchisation des sources de bruit. Les progrès en traitement numérique du signal ont permis de faire émerger les techniques d'imagerie à l'aide de réseaux de microphones comportant jusqu'à plusieurs centaines de microphones. On obtient des images qui permettent de « voir » le bruit (Figure 8). Cette technique, devenue incontournable dans la plupart des études, a fait l'objet d'un article paru dans la Lettre 3AF n° 34 (novembre-décembre 2018).



Figure 8 : Identification de sources acoustiques en vol par antenne focalisée

Concernant le volet des simulations numériques, la taxonomie des approches est très riche. Selon l'objectif que l'on souhaite atteindre en termes de précision de calcul et de rapidité de restitution, on trouve en première approche les méthodes empiriques ou semi-empiriques qui sont utilisées pour les phases de pré-design, pour l'estimation d'ordre de grandeur ou pour les études paramétriques. Par exemple, le module CARMEN de l'ONERA (module « bruit intégré » à la plateforme IESTA) est basé sur des modèles acoustiques simples, recalés avec des bases de données expérimentales. On peut ainsi obtenir, en temps différé court (quelques secondes à quelques minutes), le bruit de l'avion complet au cours d'une trajectoire d'approche ou de décollage. Le bruit est constitué de la contribution des sources principales, intégrant des effets de l'installation

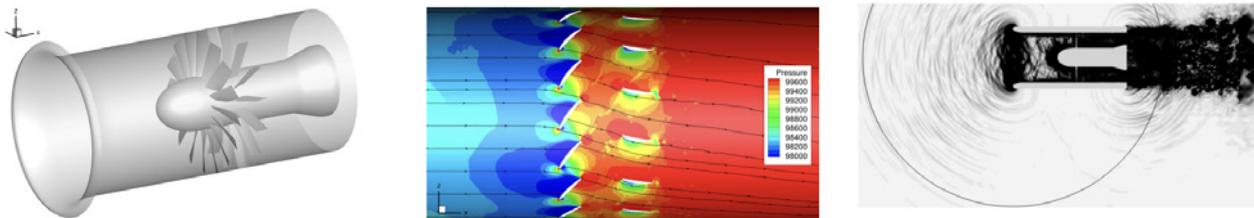


Figure 9 : Géométrie du banc turbofan, pression statique instantanée, ondes acoustiques rayonnées vers l'amont (gradient instantané de densité)

de ces sources sur l'avion, et de la propagation atmosphérique. Ce type de modélisation permet par exemple de mener des études comparatives en niveaux acoustiques relatifs et de hiérarchiser les options vertueuses sur le plan de l'émission acoustique.

La voie royale serait de résoudre les équations de la mécanique des fluides depuis la région des sources jusqu'au point d'écoute, puisque les formulations issues des lois fondamentales contiennent intrinsèquement les grandeurs acoustiques telles que les fluctuations de pression, de vitesse et de masse volumique. Ce calcul direct complet est encore inaccessible pour les applications industrielles en aéronautique car les maillages seraient hypertrophiés en nombre de cellules et les temps de calculs extrêmement longs du fait de la nécessité de déterminer ces grandeurs fluctuantes en chaque point de l'espace. Actuellement, les simulations numériques de cas complexes sont le plus souvent menées en couplant au moins 2 phases de calculs parmi les 3 suivantes : (i) le calcul par CFD (Computational Fluids Dynamics) instationnaire des grandeurs de l'écoulement turbulent dans la zone des sources turbulentes, (ii) la propagation par CAA (Computational AeroAcoustics) des grandeurs conservatives en milieu inhomogène dans une zone proche des sources ou de l'avion et (iii) le rayonnement du bruit jusqu'à l'observateur dans une atmosphère homogène par des méthodes intégrales. Depuis environ deux décennies, de nouvelles méthodes numériques basées sur la méthode Boltzmann sur réseau (Lattice-Boltzmann Method ou LBM) émergent dans le domaine de l'aéroacoustique, permettant de résoudre simultanément les phases (i) et (ii) avec des performances inégalées par les méthodes classiques en termes de temps de mise en données et de restitution. Cependant la limitation intrinsèque aux nombres de Mach subsoniques (inférieurs à 0,4) modère encore l'essor des méthodes LBM dans le domaine aéronautique, de sorte que les deux approches CFD-CAA et LBM vont coexister à court et moyen terme. La figure 9 illustre un calcul complexe réalisé par l'ONERA en LBM (code ProLB) concernant l'écoulement interne/externe et le bruit rayonné par le banc de turbofan ANCF de la NASA.

LA RÉDUCTION DES NUISANCES SONORES

L'exposition à long terme et de manière répétitive à des niveaux de bruit importants se traduit par une nuisance sonore qui affecte la qualité de vie et qui peut même être, dans certains cas, la source d'un mal être, voire provoquer des troubles sur la santé des riverains d'aéroports. Un indicateur du niveau de bruit pendant une journée (jour, soir et nuit) est utilisé pour qualifier la gêne liée à l'exposition au bruit. Une pondération de + 5 dB est appliquée à la période du soir et de +10 dB à celle de la nuit pour tenir compte du fait que les personnes exposées sont plus sensibles au bruit au cours de ces périodes. La valeur de 55 Lden exprimée dB(A) sert de référence pour cartographier les zones les plus exposées au moyen d'un PEB (Plan d'Exposition au Bruit). Une surveillance des niveaux réels est effectuée à partir de la mesure du niveau de bruit par des stations automatiques.

Depuis les années 2000, l'OACI a édicté des objectifs visant à la réduction des nuisances sonores. La réduction du bruit à la source est un combat mené sans relâche car il est le plus efficace. Désormais, ce premier « pilier » de la lutte contre les nuisances sonores est complété par 3 autres : les procédures à moindre bruit, la gestion des territoires autour des aéroports et les restrictions de vols pour les appareils les plus bruyants. In fine, c'est bien la gêne qu'il faut réduire et pas seulement de bruit émis par les avions. L'Europe s'est approprié ce challenge en finançant un important projet coordonné par la France et l'ONERA (ANIMA). L'objectif est d'identifier et promouvoir les bonnes pratiques pour réduire les nuisances sonores. Il s'agit de comprendre les mécanismes des facteurs acoustiques (et non-acoustiques) qui provoquent la gêne pour concevoir des nouvelles architectures d'avion, éclairer les politiques publiques et améliorer la qualité de vie des riverains des aéroports

L'AVIATION LÉGÈRE

L'aviation légère et sa pratique de loisir, voire sportive, est un patrimoine culturel national historique. Il existe en France près de 500 aérodromes qui accueillent, suivant leur histoire, une panoplie d'activités : transport, parachutisme, remorquage de planeurs, voltige, ULM, formation

de jeunes pilotes. Ce dernier point suppose d'innombrables tours de piste créant des nuisances sonores, même autour de petites plateformes, surtout le week-end et par beau temps ! La DGAC est régulièrement saisie par des plaintes qui concernent une centaine d'aérodromes. La situation est donc loin d'être idéale, raison pour laquelle des dispositions ont été prises pour classer les avions légers suivant un indice de performance sonore. Un critère servant de référence a été choisi en prenant comme repère le niveau sonore d'une conversation à voix haute. L'objectif est, le cas échéant, de délivrer des autorisations de vol différenciées pour les appareils plus ou moins bruyants. Un arrêté récent portant sur la classification des avions légers selon leur indice de performance sonore se base sur ce classement pour faire évoluer favorablement les situations critiques.

LES AVIONS SUPERSONIQUES

Plusieurs projets d'avion de transport civil supersonique sont à l'étude, surtout aux USA. La maîtrise du bruit des avions supersoniques repose sur une double problématique : la réduction du bang supersonique et le bruit au décollage. Pour le bang supersonique, il n'y a pas de réglementation applicable. Les SARPs (Standards And Recommended Practices) sont prévues pour émerger en 2024. Les américains sont porteurs de propositions et sont très actifs sur ce sujet au sein de l'OACI. L'Europe, grâce au projet RUMBLE, capitalise des éléments pour alimenter les discussions techniques qui sont complexes et âpres. Le bruit au décollage est aussi un nouveau défi pour les acousticiens car les turboréacteurs actuels ne sont pas adaptés au vol à vitesse supersonique en croisière. Le chapitre 12 a été élaboré dans les années 1970 pour Concorde avec référence au chapitre 2 traitant le cas des avions subsoniques. Depuis, il n'y a pas eu d'évolution sur la réglementation du bruit des avions supersoniques de sorte que la référence est celle des avions subsoniques. Les USA cherchent à s'affranchir du respect strict du chapitre 14, nouvellement entré en vigueur et très contraignant, pour favoriser l'émergence d'un projet de business jet supersonique apte à la certification. L'Europe, avec la France chef de file, souhaite maintenir une maîtrise des nuisances sonores et tient la position du respect des normes actuelles quelle que soit la nature de l'avion, subsonique ou supersonique.

CONCLUSION

Avec le concours des établissements de recherche, l'industrie aéronautique a engagé depuis plusieurs décennies des efforts considérables pour développer de nouvelles technologies visant à la réduction du bruit des avions. Ces efforts pour réduire le bruit à la source sont poursuivis et ils sont désormais accompagnés par des études portant sur l'analyse des critères de gêne afin de mieux cibler la réduction des nuisances sonores autour des aéroports. ■

LE KÉROSÈNE, CE HÉROS INCONNU !

par Mickaël Sicard, ONERA

Prendre sa voiture, un train ou un avion est devenu d'une terrible banalité. Toutefois, assis dans la salle d'embarquement de l'aéroport d'Orly alors que je me rends à une réunion du Comité Français de Coordination du Carburéacteur, j'ai toujours ce moment, partagé avec bon nombre d'autres passagers, d'émerveillement à voir ces mastodontes s'élever dans les airs. Gavés de technologie, ils ont été conçus, fabriqués puis exploités par toute une filière d'excellence (centres de recherche, équipementiers, motoristes, aviateurs, compagnies aériennes, sociétés de maintenance...). Lorsque je parle de technologie aérienne avec des pilotes, des hôtesse ou des passagers, il sera question de moteurs, de matériaux, d'aérodynamique, de radars... mais jamais un petit mot flatteur ne sera prononcé sur le carburéacteur. Pire, le kérosène ne sera évoqué qu'au moment où nous nous installons dans l'appareil. En effet, lorsque le plein est en cours, il nous est recommandé, pour des raisons de sécurité, de ne pas nous attacher en cas d'évacuation d'urgence. Rassurant... Si le carburéacteur est méconnu du grand public, est-il au moins apprécié dans le monde de l'aéronautique ? Là encore, nouvelle déconvenue... Jeune chimiste embauché à l'ONERA, je discutais alors avec un collègue combustionniste. Quelle ne fut pas ma surprise de découvrir que pour lui le kérosène se résumait à une molécule en $C_{11,2}H_{21,3}$? Je tentais de le convaincre de sa complexité et je lui parlais de toutes les molécules qui le constituait et de leur diversité. Non, non, me répondit-il, j'ai déjà des temps de calcul suffisamment longs pour mes simulations. Mes modèles ne peuvent pas prendre en compte plusieurs molécules pour le carburant. Sa réponse était sans appel. Ensuite, je me suis vite rendu compte que dans nos différentes sociétés, nous n'étions vraiment pas très nombreux à travailler sur le sujet au regard des autres domaines scientifiques et techniques. Je tournais alors mon regard vers les pétroliers. Le kérosène est le produit le plus « chouchouté » par les raffineurs. Lueur d'espoir. Pourquoi « chouchouté » ? En fait, le kérosène est un produit « casse-pieds ». Les normes de production sont tellement contraignantes qu'il faut en permanence s'assurer que ses caractéristiques n'évoluent pas, qu'il n'est

pas pollué lors de son transport ou de son stockage ; on va même jusqu'à le filtrer et à le déshydrater au moment de la mise à bord de l'avion... À ce moment de mon histoire, la situation n'est pas exceptionnelle pour le kérosène : ignoré, méprisé, incompris... Est-il possible de changer cette perception ?

Revenons tout d'abord à la technologie aéronautique. Depuis l'essor de l'aviation commerciale avec la mise service, en 1952, du De Havilland Comet ou encore de la Caravelle en 1958, les avions ont considérablement évolué. Tout a changé, tout a été optimisé. Les moteurs sont passés d'un simple flux à un double flux et double corps avec un taux de dilution qui ne cesse d'augmenter avec la taille de la soufflante. Les matériaux composites ont fait leur apparition. Les commandes de vol sont devenues électriques. L'ordinateur et l'informatique sont présents partout. Bref, l'avion s'est métamorphosé pour devenir plus sûr, plus efficace, plus rapide. Et le kérosène dans tout ça ? Bien sûr, il a évolué depuis les années 50. Toutefois, cela s'est passé de manière plutôt progressive sans à-coups. Ces évolutions sont issues de compromis et pilotées, généralement, par des raisons de sécurité. Jusqu'à récemment, il n'y avait pas eu de remise en cause complète du kérosène ni de saut technologique. Ce n'est plus le cas aujourd'hui, il est possible d'affirmer qu'une révolution est en cours pour le kérosène aussi bien au niveau de sa production que de la compréhension du produit.

Prenons maintenant le temps de découvrir ce mal aimé... Issu du pétrole, il est généralement obtenu par distillation directe. C'est une coupe qui se situe, pour simplifier, entre l'essence et le gazole et qui est centrée sur des molécules ayant 12 atomes de carbone avec une distribution en forme de gaussienne. Il est constitué de plusieurs milliers de composés. Toutefois, encore pour simplifier, les molécules présentes peuvent aussi être classées en trois grandes familles : les alcanes saturés linéaires et ramifiés, les alcanes cycliques saturés, les mono, voire les di-aromatiques (Tableau 1).

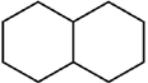
Structure		Désignation courante
		Alcanes saturés linéaires et ramifiés
		Mono et di-alcanes cycliques saturés
		Mono et di-aromatiques

Tableau 1 - Structures et désignations courantes des trois principales familles d'hydrocarbures présentes dans un carburéacteur

La présence de soufre est aussi observée. La teneur maximale est réglementée en raison de problèmes de corrosion et de pollution. La quantité totale maximale admise est de 3000 ppm, seuil d'ailleurs rarement atteint, la moyenne étant plutôt vers 500 ppm, mais ce qui est bien au-delà des carburants terrestres de plus en plus limités à 10 ppm dans le monde. Il faut aussi noter la présence d'autres molécules contenant des hétéroatomes comme de l'oxygène, de l'azote et des métaux. Même présentes en très faibles quantités, elles peuvent avoir un impact significatif sur, par exemple, la stabilité thermique. Voilà pour sa composition chimique ; passons maintenant à ses caractéristiques physico-chimiques et à ses missions. Le kérosène doit être opérationnel de -47 à plus de 150 °C. C'est le seul carburant à être utilisable sur une aussi grande plage de température sans problème technique ou de sécurité. Dans le domaine des basses températures, le point de disparition du dernier cristal du Jet A-1 doit être au minimum de -47 °C et, pour être pompable, il doit conserver une viscosité inférieure à 12 cSt à -40 °C. Son point d'éclair est supérieur à 38 °C. Dans le domaine des hautes températures, il doit être stable thermiquement, se vaporiser de façon optimale dans la chambre de combustion tout en fournissant une énergie de combustion supérieure à 42,8 MJ/kg. D'après le diagramme de Ragone (performances des techniques de stockage d'énergie), c'est la source d'énergie qui présente le meilleur compromis masse embarquée/autonomie très loin devant les batteries, super condensateurs, les piles à combustible... Pourquoi toutes ces particularités ? Bien sûr, pour fournir une source d'énergie suffisante lors de la combustion mais aussi assurer ses autres rôles dans l'aéronef, par exemple, comme liquide de refroidissement ou fluide hydraulique. De plus, pour des raisons de sécurité, il doit permettre le ré-allumage du moteur en altitude ainsi que le démarrage à froid, être compatible avec toutes sortes de matériaux... Impressionnant, n'est-ce pas ? Pour garantir les performances du kérosène, il doit répondre à deux normes internationales : l'ASTM D1655 et la DEF-STAN 91-091. Il prend alors le nom de Jet A-1 ou de Jet A. Ces normes décrivent une liste de propriétés physico-chimiques à contrôler ainsi que des valeurs cibles ainsi que les normes utilisées pour les mesurer. Le kérosène étant le héros de cette chronique, il ne peut exister sans ennemis. Il en a deux principaux : l'oxygène et l'eau. Les deux sont présents en toutes petites quantités, quelques dizaines de ppm, dans la mesure où le kérosène est un produit notablement hydrophobe et apolaire. Toutefois, l'oxygène dissous joue un rôle primordial dans la dégradation thermique du carburant. Lorsque celui-ci est porté à des températures supérieures à 150°C, les hydrocarbures se décomposent et forment avec l'oxygène des hydroperoxydes. Ces molécules sont les initiateurs d'un mécanisme en chaîne qui conduit à la formation de dépôts solides, de vernis et de coke qui seront retrouvés dans le

circuit carburant, les rampes d'injection, les injecteurs eux-mêmes... Ces dépôts peuvent avoir des conséquences dramatiques et entraînent des maintenances préventives et curatives. Des solutions ? Oui, il en existe. Elles peuvent être complexes à mettre en œuvre et ont un coût significatif. L'idéal serait de retirer l'oxygène au moment de l'avitaillement. Il est possible aussi de rajouter des additifs qui améliorent la stabilité thermique mais cela a un coût qui peut paraître prohibitif. La stabilité thermique est un véritable sujet de recherche qui mobilise de nombreuses personnes, ceci d'autant plus que les charges thermiques supportées par le carburant augmentent sensiblement avec les nouvelles générations de moteurs. L'eau, quant à elle, est cause de deux soucis. Le premier en vol car bien que le kérosène soit déshydraté au moment de l'avitaillement, l'eau est apportée par l'air rentrant dans les réservoirs lorsqu'ils se vident. Cette eau peut se fixer sous forme de glace dans les canalisations ou s'accumuler dans les filtres avec les conséquences que l'on imagine facilement en cas de détachement brutal d'un amas de glace ou d'obturation d'un filtre. Pour rappel, en 2008, un incident, perte de puissance des moteurs, est survenu avec un Boeing 777 en approche finale sur Heathrow [1]. D'après l'enquête, cet incident serait lié à une restriction apparue soudainement dans le circuit carburant suite au détachement de blocs de glace. Ensuite, le second problème lié à l'eau est son accumulation, au cours des vols et des périodes de parking, dans les parties basses des réservoirs. L'eau n'est pas vraiment le souci, ce sont plutôt les micro-organismes qu'elle contient qui posent problème (levures, champignons, bactéries...). Ces organismes vont se développer dans l'eau et consommer le kérosène à l'interface entre les deux milieux. Cette contamination microbienne entraîne la formation de films organiques sur les parois, acidifie le milieu et conduit à une potentielle corrosion. Si un traitement biocide n'est pas mis en place à temps, il ne reste plus qu'à purger les réservoirs et à exercer une action mécanique (brosses, chiffons...) pour nettoyer les réservoirs. Pourtant, la solution existe et elle est très simple. Il suffit de purger les réservoirs de cette eau en l'évacuant par les points bas.

Au regard de tous les éléments cités précédemment, quel système serait capable de remplir une telle mission ? Objectivement ? Aucun ! Aujourd'hui, pourtant, on lui reproche sa nature hydrocarbonée. Oui, la combustion d'une tonne de kérosène produit 3,16 tonnes de CO₂. En 2019, l'aviation en émettra plus de 900 millions de tonnes [2]. Cela représentera un peu plus de 2 % des émissions de nos industries. Avec l'augmentation du trafic aérien, cela ne pourra que continuer à croître. Bien qu'en théorie la combustion du kérosène ne produise que de l'eau et du dioxyde de carbone, elle n'est pas idéale et comme le kérosène contient aussi des hétéroatomes, d'autres composés sont formés : des imbrûlés, des suies, des oxydes de soufre

SO_x et d'azote NO_x. Ces derniers sont liés aux conditions thermodynamiques rencontrées dans la chambre de combustion. Tous ces produits se retrouvent dans le sillage de l'avion et ont un impact potentiel sur le réchauffement climatique (CO₂, traînées de condensation) et la qualité de l'air, notamment en environnement aéroportuaire (NO_x, SO_x, suies). Ce n'est pas acceptable. Pourtant, nous avons fait de grands progrès dans ce domaine. Les moteurs sont devenus beaucoup plus propres grâce aux technologies d'injection multipoints, aux chambres à deux têtes... Concernant le CO₂, le meilleur moyen pour limiter les rejets, c'est tout d'abord de réduire la consommation en kérosène. Le moins que l'on puisse dire, c'est que l'industrie aéronautique a été capable de la limiter de manière spectaculaire [3]. Pour preuve, la consommation moyenne est passée de plus de 10 L/passager/100 km à environ 3 L/passager/100 km entre les années 1960 et 2015 (Figure 2). Les appareils de nouvelles générations comme l'Airbus A350-900 et le Boeing 787-10 annoncent des consommations de l'ordre de 2,3 L/passager/100 km. Les progrès techniques (moteurs, aérodynamique de l'avion, matériaux...) expliquent ce résultat.

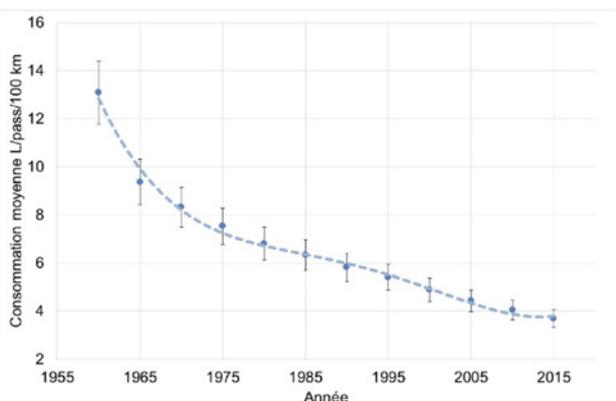


Figure 2 - Consommation moyenne de kérosène en litre par passager et pour 100 km sur la période de 1960 à 2015

Pour aller encore plus loin, les acteurs du domaine se sont fixés des objectifs ambitieux. Ainsi, l'ATAG (Air Transport Action Group) souhaite obtenir :

- une croissance neutre en carbone à l'horizon 2020 ;
- une réduction de 50 % de l'empreinte carbone du transport aérien à l'horizon 2050 par rapport au niveau de 2005.

Pour ce faire, il est visé :

- d'améliorer la technologie (moteurs, structures de l'avion) ;
- de mieux gérer le trafic aérien ;
- de développer et de distribuer des carburéacteurs durables.

L'OACI n'est pas en reste et cherche à mettre en place un système d'obligation d'achat de crédits de compensation des émissions de CO₂ supérieure à celle correspondant au niveau des émissions de l'année 2020. Ce programme serait nommé CORSIA [4]. Il devrait entrer en vigueur sur une base volontaire en janvier 2021 et deviendra obligatoire à partir de 2027.

Le développement de carburéacteurs durables fait indiscutablement partie des moyens qui permettront de réduire de façon significative l'empreinte carbone du transport aérien. Or, le pétrole, comme indiqué au début de ce texte, est « la matière première » du kérosène. Comment modifier ce paradigme et trouver de nouvelles ressources hydrocarbonées sans remettre en cause la sûreté des vols ? En 1999, la société SASOL en Afrique du Sud fut la première à apporter une solution viable et au moins partielle sous la forme du carburéacteur SSJF (Semi-Synthetic Jet Fuel). Il est constitué d'hydrocarbures synthétiques, des alcanes, issus du charbon et obtenus à partir du procédé Fischer-Tropsch (F-T). Ce carburant marque le point de départ des carburants alternatifs dans l'aviation même s'il n'était pas d'origine renouvelable. La certification d'un tel carburant a nécessité un important travail de compréhension du comportement du carburant et de son impact sur le fonctionnement de l'aéronef. En effet, se posait alors la question de la définition d'un processus et d'un cahier des charges qui permettraient de garantir la compatibilité totale du nouveau carburant avec les systèmes existants (avions et infrastructures). Ceci est d'autant plus important que ces produits avaient des caractéristiques et des compositions chimiques susceptibles de différer sensiblement de celles du kérosène d'origine fossile. Ce travail de formalisation a été principalement réalisé dans le contexte de l'ASTM International, qui a abouti avec la publication des normes ASTM D4054 et ASTM D7566. La première décrit le processus d'approbation qui est découpé en quatre étapes. Elles sont progressives et éliminatoires de la simple caractérisation physico-chimique jusqu'aux essais moteurs. Au terme de ce processus, qui a pu être jugé long, complexe et coûteux, mais qui permet de s'assurer que le carburant répond à toutes les exigences de sécurité et de fiabilité les plus sévères, le carburant est certifié et intégré dans la norme D7566 qui décrit, quant à elle, les propriétés physico-chimiques, les caractéristiques et les taux d'incorporation de tout nouveau carburant dans le carburant fossile.

En 2019, cinq procédés ont été approuvés et sont décrits sous la forme d'annexes dans la norme ASTM D7566 :

1. le kérosène isoparaffinique synthétisé par le procédé Fischer Tropsch (FT-SPK) a été approuvé en septembre 2009. Les matières premières peuvent être du charbon, du gaz naturel ou encore de la biomasse.
2. les esters et acides gras hydrotraités (HEFA) ont été approuvés en juin 2011. Les matières premières lipidiques telles que les huiles de plantes ou d'algues, le suif (graisse animale) ou les graisses usées telles que les huiles de cuisson sont hydrotraitées pour éliminer l'oxygène et produire un mélange d'alcane.
3. l'ASTM a approuvé l'intégration, en juillet 2014, de l'isoparaffine de synthèse (SIP). L'alcane produit, le farnesane, est issu de la fermentation de sucres. La grande différence entre ce «carburant» et les carburants alternatifs FT-SPK ou HEFA-SPK est que le farnesane n'est pas un mélange mais un seul alcane ramifié ayant 15 atomes de carbone.
4. le carburéacteur Fischer Tropsch (FT-SPK/A) avec mono-aromatiques a été approuvé en novembre 2015. Le FT-SPK/A est une variante du procédé FT dans laquelle les aromatiques sont mélangés avec des paraffines afin de produire un carburéacteur entièrement synthétique qui peut être utilisé sans mélange avec du kérosène fossile.

5. la filière Alcohol to Jet (AtJ), approuvée en avril 2016, convertit des alcools (produits à partir de sucre, d'amidon ou de matière lignocellulosique), comme l'éthanol ou l'isobutanol, en un mélange d'alcane.

En outre, l'ASTM a approuvé le traitement simultané (on parle de co-processing) de lipides renouvelables (graisses végétales et animales) avec des distillats moyens dérivés du pétrole brut dans les raffineries de pétrole. Il est possible de co-transformer jusqu'à 5% en volume de graisses et d'huiles.

Il est important de noter que tous ces carburants sont principalement constitués d'alcane linéaires et ramifiés (Tableau 2). Le taux d'incorporation de ces carburants alternatifs est limité à 50% dans un carburéacteur d'origine fossile afin de garantir, entre autres, un taux d'aromatiques au minimum de 8% en volume. La présence de ces molécules est à la fois positive et négative. D'un côté, elles seraient les précurseurs des imbrûlés et des suies, de l'autre elles permettraient d'assurer le gonflement des joints et augmenterait la masse volumique du carburéacteur.

Il apparaît donc que parmi les filières certifiées ou en cours de certification, nombreuses sont celles utilisant

Nom	Procédé	Ressource	Hydrocarbures	Taux de mélange dans un carburant fossile (% vol. max)
FT-SPK (Fischer Tropsch - Synthesized Paraffinic Kerosene)	Gazéification	Gaz de synthèse issu du charbon, gaz, biomasse...	Distribution gaussienne d'alcane	50
HEFA-SPK (Hydroprocessed Esters of Fatty Acids - Synthesized Paraffinic Kerosene)	Hydrotraitement isomérisant	Huiles végétales et usées et graisses animales	Distribution gaussienne d'alcane	50
SIP (Synthetic Iso-Paraffin)	Fermentation puis hydrogénation	Sucres	Un alcane en C ₁₅	10
AtJ-SPK (Alcohol to Jet - Synthesized Paraffinic Kerosene)	Production d'alcools, puis déshydratation, oligomérisation, hydrotraitement	Sucres, lignocellulose	Alcane en C ₁₂ et C ₁₆	50
IPK/A (FT-SPK + coupe mono-aromatique)	Gazéification Alkylation	Gaz de synthèse issu du charbon, gaz, biomasse...	Distribution gaussienne d'hydrocarbures	50
HEFA-SPK (traitement simultané avec distillats moyens)	Co-processing	Huiles végétales et usées et graisses animales	Distribution gaussienne d'hydrocarbures	5

Tableau 2 – Carburéacteurs approuvés et caractéristiques principales

des matières renouvelables (biomasse ou déchets). Elles pourront donc grandement contribuer à réduire l'empreinte carbone du transport aérien. Si aujourd'hui plusieurs procédés sont matures d'un point de vue technique, voire industriel, la production en grandes quantités n'est pas encore pour demain. De nombreux freins existent, comme par exemple :

- le coût et la disponibilité de la matière première ;
- le coût du carburant alternatif qui reste très supérieur à celui d'origine fossile ;
- l'absence de visibilité de la viabilité économique de certaines filières ;
- le manque d'incitation politique des états pour promouvoir un kérosène renouvelable sur lequel il n'est pas possible de jouer sur une fiscalité qui n'existe pas, mais cela est en train de changer petit à petit aux USA (Californie) et en Europe ;
- le manque de moyens de production...

Pour résumer, que le kérosène soit d'origine fossile ou alternative, il est confronté à de nouveaux défis. Il doit tout d'abord assurer de nombreuses fonctions dans un environnement de plus en plus contraignant. Cela nécessite donc de mieux comprendre son comportement afin d'utiliser au mieux ses possibilités. Le lien entre la composition chimique et les propriétés associées fait l'objet de nombreuses études. Je citerai par exemple :

- les programmes internes ONERA, EXPLIC (terminé en 2018) et PROPHÉCIE (en cours), qui se focalisent sur l'introduction des carburants alternatifs à divers taux et leurs impacts sur l'évolution des caractéristiques et du comportement des carburants (compatibilité matériaux, pulvérisation, émissions...);
- le programme DGAC, MOCCASSIN, qui vient de se terminer et qui a porté notamment sur les comportements à froid (problématiques d'injection, rallumage à froid) et à chaud (cokéfaction) ;
- le programme européen JETSCREEN, toujours en cours, qui est ciblé sur la modélisation des propriétés du carburant et son comportement en service.

L'introduction de carburants alternatifs pour des raisons environnementales et/ou d'indépendance énergétique a obligé à mettre en place tout un processus de certification assurant son emploi en toute sécurité. De nombreux autres produits sont en cours de certification dont certains seraient capables de se substituer complètement le carburant d'origine fossile. Il est même aujourd'hui question d'utiliser des carburants paraffiniques purs. Ceci nécessitera nécessairement la mise en place de programmes de recherches pour vérifier que l'absence des autres composés ne posera pas de problèmes et permettra d'atteindre les objectifs visés, notamment, de réduction des émissions, des trainées de condensation.

Non, décidément, cette thématique est en pleine révolution. C'est vraiment un sujet passionnant. Qu'en pensez-vous ?

RÉFÉRENCES

- [1] - AIRCRAFT ACCIDENT REPORT 1/2010 - Report on the accident to Boeing 777-236ER, G-YMMM, at London Heathrow Airport on 17 January 2008
- [2] - IATA Industry Statistics Fact Sheet June 2019
- [3] - OACI, Résolutions adoptées par l'assemblée - 39ème session, Montréal 27 septembre - 6 octobre 2016
- [4] - https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure-FR-Mar2019_Web.pdf ■

INTERVIEW DU COMMANDANT CYRIL HOSPITAL, COMMANDANT L'ÉCOLE D'AVIATION DE TRANSPORT (EAT), BASE AÉRIENNE 702 D'AVORD

par Jean-Pierre Sanfourche, Chargé de mission à la 3AF



CDT Cyril HOSPITAL : Entré au service le 1er septembre 2003 à l'École de l'air - Promotion « Capitaine Vincent Beau » (EA03)

Breveté pilote militaire de Transport en mars 2008 et affecté à l'Escadron de Transport 01.064 « Béarn ». Certifié commandant de bord en mai 2012. Commandant de l'EAT depuis juin 2019.

Corrézien, né en 1982, marié et père de 3 enfants. Totalise 3000 heures de vol et 120 missions de guerre, réalisées durant une douzaine d'opérations extérieures (au Tchad, en Côte d'Ivoire, en Afghanistan, au Sénégal, au Mali, au Niger...)

Jean-Pierre Sanfourche - Voici un peu plus d'un an que le nouveau cursus de formation des équipages de transport est entré en application, je souhaiterais faire le point avec vous sur la façon dont se déroule sa mise en place. Tout d'abord une première question : comment les futurs membres d'équipage de transport sont-ils recrutés ?

Cyril Hospital : Comme pour les pilotes de chasse, le recrutement des membres d'équipages de transport est possible selon 2 voies :

- En entrant par l'École de l'Air, via un concours de niveau BAC+3 ou BAC+5, afin de devenir officier de carrière, et suivre une formation initiale d'ingénieur ;
- Ou directement après le BAC afin de devenir officier pilote sous contrat.

Ces stagiaires pilotes commencent par une phase de formation initiale théorique et militaire ainsi que des cours d'anglais intensifs avant les premières phases en vol et la répartition entre la chasse et le transport. En effet, toute l'instruction se passe évidemment en langue anglaise.

Actuellement, les pilotes de chasse sont envoyés à Cognac à l'issue de cette phase de tronc commun. Nous recevons, à l'EAT, tous les stagiaires orientés pilotes de transport militaire de l'Armée de l'air, de la Marine nationale, de la DGA (Direction générale de l'armement). Nous travaillons étroitement avec la Belgique, le Luxembourg, les Pays-Bas, de nombreux pays africains, le Koweït et dernièrement l'Italie. Nous avons d'ailleurs un instructeur belge et un instructeur italiens au sein de nos effectifs d'instructeurs.

JPS - Comment appréciez-vous le déroulement en quatre étapes de la formation des futurs pilotes de transport et des futurs navigateurs de transport : Phase 1 : tronc commun Salon-de-Provence appareil SR 22 - Phase 2 : Cognac GROB 120 - Phase 3 : Avord XINGU - Phase 4 : Escadrons A400M, Casa, Falcon, C 160 ?

CH : La phase 1 et la phase 2 sont les mêmes pour tous les élèves pilotes :

- Phase 1 à Salon-de-Provence : 2 mois et demi. Initiation sur avion à moteur Cirrus SR 20 (25 heures).
- Phase 2 à Cognac : 4 mois et demi. 35 heures de vol sur Grob 120 A. Cette phase permet de délivrer une instruction plus poussée, en abordant la voltige et le vol en formation en particulier, et aussi d'orienter les élèves vers les filières « chasse » ou « transport ».
- Vient alors l'heure de l'orientation : chasse ou transport ? L'orientation s'opère en fonction de plusieurs critères : les besoins en pilotes de transport (chiffre communiqué par la DRH de l'Armée de l'air) - le classement de sortie en fin de phase 2 - les desiderata des élèves. Je tiens ici à souligner deux choses : 1) ne vont pas dans le transport les stagiaires qui ont été déclarés inaptes « chasse » ; 2) le pilote de transport militaire est un pilote de combat.
- La phase 3 se déroule sur la BA 702 d'Avord.
- La phase de différenciation vient terminer la formation avant l'affectation dans les forces.

FORMATIONS ET CARRIÈRES

INTERVIEW DU COMMANDANT CYRIL HOSPITAL, COMMANDANT L'ÉCOLE D'AVIATION DE TRANSPORT (EAT), BASE AÉRIENNE 702 D'AVORD



La base aérienne BA702 d'Avord

Cette phase 3 est le cœur de notre mission à Avord. Elle est effectuée avec le Xingu Embraer 121 et se déroule sur une durée de 45 semaines. Elle est assurée par des instructeurs anciens commandants de bord ayant une grande expérience et qui viennent d'unités opérationnelles. C'est le point fort de notre formation !

Cette phase a pour objectif de délivrer les compétences nécessaires au vol aux instruments et l'obtention de compétences techniques en maniabilité permettant d'accéder à la QT (qualification de type) EMB 121. Elle est sanctionnée par l'obtention de la première carte de VSV (Vols sans Visibilité) et de l'IR (*Instrument Rating*). Une partie MCC (*Multi Crew Cooperation*), au simulateur, complète la formation de travail en équipage.

À l'issue de ces 45 semaines, les élèves obtiennent leur Brevet de Pilote militaire et sont réparties dans 4 sections spécialisées pour suivre une formation différenciée, en fonction de l'avion sur lequel ils sont orientés :

- La section « **Avions verts** » forme les futurs pilotes d'avions dits « tactiques » : A400M ; Casa C 130, La durée

d'enseignement est de 7 semaines avec notamment des vols basse altitude (330 pieds), des vols IFR, des simulations de largage, de poser d'assaut, et d'atterrissage grande pente...

- La section « **Avions gris** » forme les futurs pilotes d'avions de ravitaillement en vol : C 135, MRTT. La durée de la formation est d'environ 5 semaines et comprend entre autres des vols IFR, à l'étranger, hors d'Europe et des simulations d'opérations de « *refuelling en vol* » et des gestions carburants exigeantes.
- La section « **Avions blancs** » forme les futurs pilotes d'avions dits « stratégiques » dont la mission est principalement le transport des personnels : Falcon 900, Falcon 2000, TBM pour le transport de hautes personnalités ou les Airbus A340, A310 pour la mise en place des personnels militaires en opération extérieure. Sa durée est de l'ordre de 5 semaines. Elle est essentiellement axée sur des vols de navigation aux instruments.
- La section « **Marine nationale** » forme les futurs pilotes de l'aéronautique navale qui seront chargés d'opérations de recherche de sous-marins, de surveillance maritime, de surveillance des flux migratoires, de missions d'anti-piraterie, de lutte anti-drogue, ces stagiaires ont suivi le même cursus initial que les stagiaires de l'Armée de l'air et commencent leur spécialisation au sein de l'EAT avec des cadres de la Marine nationale.

JPS - Comment les élèves sont-ils dirigés vers l'une de ces sections ?

CH : L'orientation se décide en fonction du classement en fin de phase 3, et en fonction des desiderata exprimés par les élèves. Bien évidemment les besoins de la DRHAA entrent aussi en compte dans cette équation qui trouve sa conclusion lors d'un « amphi » appelé le conseil d'orientation qui regroupe des représentants de la DRHAA et des commandements organiques de leurs futures

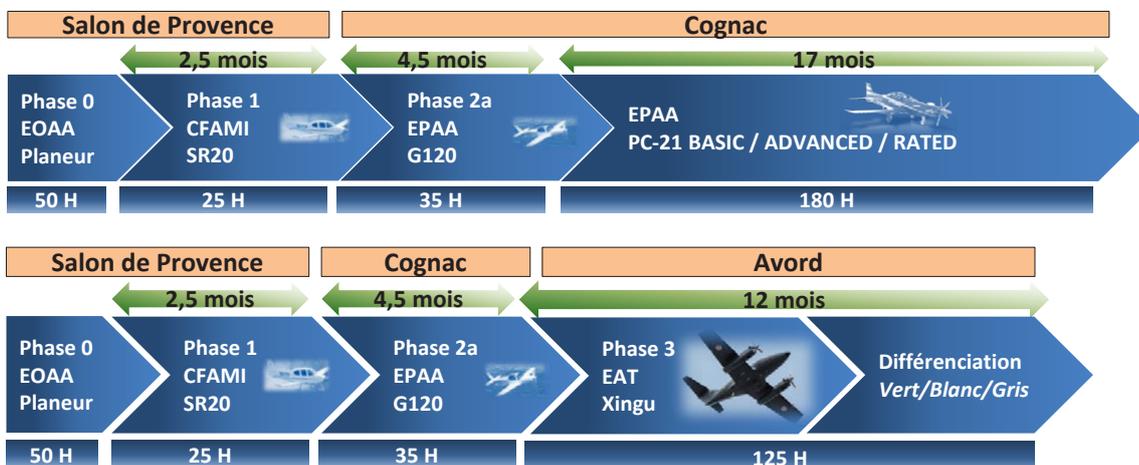


Schéma du cursus de formation modernisé des pilotes de transport de l'Armée de l'air

INTERVIEW DU COMMANDANT CYRIL HOSPITAL, COMMANDANT L'ÉCOLE D'AVIATION DE TRANSPORT (EAT), BASE AÉRIENNE 702 D'AVORD

unités. Cette opération se passe très bien en général. La variété des missions et des avions permet in fine aux stagiaires d'avoir un choix ajusté à leurs souhaits et leurs compétences.

JPS - Les différents appareils utilisés jusqu'en fin de phase 3 donnent-ils entière satisfaction ?

CH : Le Xingu Embraer 121 est un excellent appareil pour la formation de nos pilotes. Il est difficile à piloter, en raison de son court fuselage (comparé à sa longue envergure) et de l'éloignement des moteurs. Il requiert en effet des efforts importants au palonnier lorsqu'on coupe un moteur. Il faut savoir que nous entraînons nos stagiaires 60% du temps à la configuration panne sur l'un des deux turbopropulseurs. Il est aussi très bien adapté pour le travail en équipage à 2 - pilote et copilote. Par ailleurs il est muni de trains très robustes, ce qui est appréciable compte tenu des atterrissages durs auxquels ils sont souvent soumis lors des entraînements.

Utilisé depuis 1982 dans l'Armée de l'air, le Xingu a quelques années d'expérience à son actif . Les réflexions commencent donc pour lui trouver un remplaçant, tâche qui ne sera pas si simple au vue du niveau de satisfaction que donne ce vecteur.



Le Xingu est un avion brésilien, construit par Embraer, nommé plus précisément EMB 121.

C'est un appareil doté de 2 turbopropulseurs PT6A de 700 chevaux. Il permet le vol à très basse altitude tout comme le travail aux instruments jusqu'à 8000m d'altitude le tout à une vitesse de croisière avoisinant les 400km/h. Son autonomie d'environ 5h, permet des vols d'instruction partout en Europe et dans les pays limitrophes.



Le cockpit du Xingu

JPS - Quels sont en fait les grands changements intervenus depuis 2018 ? Quels jugements portez-vous sur eux ?

CH : La modification majeure du système de formation ces dernière années a été le transfert de la phase de pré-spécialisation transport de Cognac vers Avord (cf. Schéma du cursus de formation modernisé des pilotes de transport de l'Armée de l'air). Ce transfert nous a permis de raccourcir le temps de formation et de libérer de la ressource sur Cognac afin de préparer l'arrivée du PC 21 et surtout de recentrer la formation transport sur un vecteur adapté et dans un environnement beaucoup plus marqué de l'empreinte « transport ».

Ce transfert a nécessité une phase d'adaptation, car le niveau des stagiaires entrant étant différent, nous avons revu les programmes et l'ensemble de nos cours théoriques. Mais nous avons globalement atteint notre rythme de croisière pour amener les stagiaires au même niveau final voire même un niveau plus élevé, grâce à la phase de différenciation.

JPS - Beaucoup d'efforts sont accomplis depuis plusieurs années pour optimiser les chances de réussite des candidats. Les résultats sont-ils à la hauteur des ambitions ?

CH : Oui tout à fait. À Avord nous mettons en œuvre l'enseignement par la réussite, et non la méthode de l'élimination. Nous créons entre l'instructeur et le stagiaire une relation de confiance, nous faisons en sorte que l'instructeur et le stagiaire soient animés par la réalisation d'un projet commun : pour l'instructeur la transmission réussie du savoir, de l'expérience, et pour l'élève, l'obtention de la qualification au métier de pilote de transport militaire. C'est la formation par le succès et non par la crainte de l'élimination. En cours de formation, les quelques élèves qui décrochent, abandonnent non pas pour des raisons d'incompétence, de notes insuffisantes,

FORMATIONS ET CARRIÈRES

INTERVIEW DU COMMANDANT CYRIL HOSPITAL, COMMANDANT L'ÉCOLE D'AVIATION DE TRANSPORT (EAT), BASE AÉRIENNE 702 D'AVORD

mais pour des raisons de démotivation. Il s'agit d'élèves qui réalisent qu'ils n'avaient le « profil » nécessaire pour réussir pleinement dans l'Armée de l'air.

JPS - La formation sur simulateur prend une place grandissante dans la formation : pourriez-vous commenter ? Comment maintenez-vous les grands équilibres entre formation théorique, instruction sur simulateurs et instruction en vol ?

CH : La formation sur simulateur est bien sûr d'une importance considérable. Il est d'ailleurs un outil tout à fait adapté pour travailler une compétence spécifique à notre métier de pilote de transport, c'est la parfaite entente entre les membres d'équipage. Un cours dédié que l'on appelle en Anglais le *Multi Crew Cooperation (MCC)* se déroule en milieu de phase 3 entièrement au simulateur avec 2 stagiaires aux commandes et un instructeur pupitre derrière qui s'attache à juger l'ensemble des compétences non techniques. Dans un avion de chasse, le pilote est seul aux commandes, ou avec un navigateur qui gère les systèmes d'arme. Dans un avion de transport, c'est un équipage qui est aux commandes et il doit régner en son sein une parfaite entente.

Les possibilités de simulation de panne offerte par le simulateur, nous permettent ainsi de pousser ces « jeunes équipages » à travailler la maîtrise des Facteurs Humains. La formule bien connue des transporteurs « 1 + 1 = 3 » est la formule qui résume le mieux l'importance de l'enseignement en cours MCC.

JPS - Les instructeurs sur simulateur sont-ils des pilotes de transport militaire, ou des instructeurs spécialisés « simulateurs » et qui ne sont pas forcément des pilotes ou anciens pilotes de transport ?

CH : Nous avons plusieurs types de missions au simulateur. Des missions réalisées avec des instructeurs pilotes et d'autre avec des sous-officiers de spécialité « MOSIM = Moniteur simulateur » qui ne sont en général pas pilotes.

- Si l'utilisation du simulateur permet bien évidemment des économies et une souplesse dans la planification, les MOSIM nous apportent en plus un soutien RH d'une grande valeur ;
- Leur haut niveau de compétences permet aux stagiaires de travailler la mécanisation de l'ensemble des procédures qu'ils seront amenés à réaliser en vol ultérieurement ;
- Bien plus que des pupitreurs, ces sous-officiers sont installés aux commandes du simulateur et réalise un véritable travail d'instruction tout à fait semblable aux instructeurs pilotes.



Photo d'une salle de simulation

JPS - Comment la formation spécifique des navigateurs se déroule-t-elle ?

CH : L'Ecole d'Aviation de Transport n'assure que la formation de pilotes. Les futurs Navigateurs Officiers Systèmes d'Armes (NOSA) sont formés à Salon-de-Provence, qu'ils soient navigateurs de chasse ou de transport.

JPS - Une partie des NOSAs formés à Salon-de-Provence est-elle appelée à servir dans le transport ? Et si oui quelles sont leurs missions ?

CH : Les NOSA Transport sont d'abord formés à l'EFNC (Ecole de Formation des Navigateurs de combats) de Salon-de-Provence et sont directement envoyés sur leurs avions d'arme.

JPS - Le nouveau cursus « Formation modernisée et formation différenciée » permet-il de réaliser des économies importantes ?

INTERVIEW DU COMMANDANT CYRIL HOSPITAL, COMMANDANT L'ÉCOLE D'AVIATION DE TRANSPORT (EAT), BASE AÉRIENNE 702 D'AVORD

CH : L'optimisation des coûts de formation est bien sûr pour nous une préoccupation permanente : les moyens informatiques modernes et les moyens de simulation sans cesse plus performants permettent de réduire les nombres d'heures d'instruction en vol. Mais il y a une limite à ces efforts de réduction des coûts, c'est la sécurité ! Il est hors de question de transiger sur la qualité de la formation de nos pilotes et donc en permanence il nous faut placer avec discernement le curseur entre économies budgétaires et sécurité, entre productivité économique et qualité de la formation.

D'ailleurs au terme de leur formation à Avord, nos élèves reçoivent la qualification civile au niveau « CPL IR » reconnue par la DGAC (Direction générale de l'aviation civile) et l'EASA (European Aviation Safety Agency). Cette confiance témoigne de la qualité reconnue de l'ensemble de notre système de formation et des efforts consentis par l'Armée de l'air pour toujours maintenir ce haut niveau de performance.

JPS - J'imagine que le passage du Xingu de la fin de phase 3 à la phase 4 à la transformation sur avions opérationnels doit être délicate, notamment le A400M ?

CH : Comme nous l'avons vu précédemment, le stagiaire en sortie de l'EAT est solidement armé pour aborder la phase de transformation en unité opérationnelle et obtenir à l'issue de cette phase ce que nous appelons la « Qualification de Type ». La durée de cette phase de transformation dépend de l'avion. Pour un A400M, il faut compter environ 1 an. Pour des avions de technologies moins avancées, elle est un peu plus courte.

L'expérience montre que cette transformation se passe en général très bien. Évidemment plus l'avion d'arme est complexe et puissant, plus la marche est grande. Mais si les procédures et les connaissances de base sont bien acquises alors la réussite est assurée.



A400M

JPS - Comment la maintenance opérationnelle de vos avions est-elle assurée ?

CH : Cette maintenance est sous-traitée dans le secteur civil, elle est assurée par une unité d'Airbus, la AFAE (Airbus Flight Academy Europe), qui est installée à Avord. Cette unité nous donne entière satisfaction, la planification est claire, et en moyenne notre ratio de disponibilité est toujours supérieur à 80%.

JPS - quelles relations entretenez-vous avec les écoles de formation étrangères et au sein de l'UE particulièrement ?

CH : Le transport aérien militaire a été précurseur en matière de coopération Européenne. L'exemple de l'EATC (European Air Transport Command à Eindhoven - Pays-Bas) en est la preuve concrète. Tout comme l'ETAC (European Tactical Airlift à Saragoose - Espagne) ou les pilotes travaillent ensemble sur des procédures tactiques communes.

L'étape suivante de cette coopération serait d'arriver à uniformiser encore les procédures et donc pourquoi pas imaginer une Ecole de l'Aviation de Transport Européenne. Et pourquoi pas l'imager en France ? La route est encore longue pour parvenir à ce niveau de coopération, mais l'EAT affiche clairement ses ambitions. En effet nous travaillons déjà main dans la main avec la Belgique et l'Italie qui nous font confiance et reconnaissent le haut niveau de formation enseigné au sein de l'EAT.

Actuellement, un syllabus commun de formation est en cours d'élaboration au sein de l'AED (Agence Européenne de la Défense). L'EAT participe évidemment avec attention à ce projet. Le choix du futur vecteur (le remplaçant du Xingu) prend donc une dimension toute particulière car il pourrait, pourquoi pas, devenir un jour le vecteur de formation commun Européen.

JPS - Pour conclure, quelles sont vos trois grandes priorités à court terme ?

1. L'Armée de l'air a besoin d'un grand nombre de pilotes de transport. Nous formons actuellement un peu moins 50 pilotes par an alors qu'il serait nécessaire d'en former 60 pour assurer un flux de pilote de transport suffisant pour les unités opérationnelles. Ma première priorité est donc l'optimisation de la formation afin d'augmenter le flux tout en conservant le même niveau de qualité pédagogique.
2. L'utilisation sans cesse augmentée et améliorée des technologies digitales dans notre formation : feuilles de procédures, planification, l'emploi intensif des IPAD,

FORMATIONS ET CARRIÈRES

INTERVIEW DU COMMANDANT CYRIL HOSPITAL, COMMANDANT L'ÉCOLE D'AVIATION DE TRANSPORT (EAT), BASE AÉRIENNE 702 D'AVORD

1. etc...L'objectif étant de rester au plus près des outils et procédures utilisés dans les forces.
2. La valorisation de nos instructeurs. Pour être en mesure de recruter des pilotes de grande expérience au sein des Forces, il est nécessaire d'offrir aux futurs instructeurs des perspectives attractives, en fait il nous faut promouvoir la Base Aérienne d'Avord et son Ecole de Transport. Pour cela, nous comptons beaucoup sur la DRH de l'Armée de l'air. ■

Quelques photos des appareils mentionnés dans l'article



SR 22



Falcon



GROB 120



Casa



XINGU



C160

ARMÉE DE L'AIR : DERNIER HOMMAGE AU TB-30 EPSILON

par Jean-Pierre Sanfourche, Chargé de mission à la 3AF



Le TB-30 Epsilon tire sa révérence et passe le relais au Pilatus PC-21

24 SEPTEMBRE 2019 : UNE CÉRÉMONIE S'EST DÉROULÉE SUR LA BASE AÉRIENNE 709 DE COGNAC POUR CÉLÉBRER LE RETRAIT OPÉRATIONNEL DE L'AVION DE FORMATION DES PILOTES DE CHASSE « TB-30 EPSILON »

Après 35 ans au service de la formation de nos pilotes de chasse, il totalisait 647 500 heures de vol !

À l'invitation du général de corps aérien Alain Ferran, directeur des ressources humaines de l'Armée de l'air, et du colonel Arnaud Gary, commandant la base aérienne 709 de Cognac-Châteaubernard « Commandant Ménard », une nombreuse assistance était venue à Cognac en cette après-midi du 24 septembre.

La cérémonie se déroula en trois temps :

- La prise d'armes, au cours de laquelle furent présentées les différentes unités de l'Ecole de formation des Pilotes de l'Armée de l'Air (EPAA) ;
- Revue des troupes par le général Ferran (Fig. 1) ;
- L'exposition statique et des démonstrations en vol du TB-30 Epsilon et de son successeur le PC-21.

À l'issue d'un défilé aérien, les TB-30 Epsilon ont été rassemblés sur la piste pour une dernière pose avant de couper leurs moteurs simultanément (Fig. 2).

L'exposition à l'intérieur du hangar de maintenance avec documents historiques (photos, vidéos, archives, dédicaces). C'est ici que le général Alain Ferran prononça son allocution (Fig. 3).

Il déclara notamment :

« Indispensable outil de formation de nos pilotes, monture des ambassadeurs de la patrouille « Cartouche Doré », vecteur pleinement intégré aux dispositifs particuliers de sûreté aérienne, notre Epsilon n'aura pas démerité dans la longue histoire des avions de l'Armée de l'air. »

La cérémonie fut clôturée par un cocktail qui permit de larges échanges entre anciens de l'Armée de l'air, les cadres de la BA 709 et les jeunes stagiaires pilotes.

FORMATION ET CARRIÈRES

ARMÉE DE L'AIR : DERNIER HOMMAGE AU TB-30 EPSILON



Figure 1. Revue des troupes par le général Ferran
photo 7017 © D. Pujou/Armée de l'air



Figure 2. Un TB-30 Epsilon a été peint avec une livrée spéciale pour marquer son retrait
photo 7492 © Pujou/Armée de l'air



Figure 3. Vue du hangar lors de l'allocution du général Alain Ferran.

Cet article a été composé en collaboration avec l'adjudant Barbara Le Prat, Chargée de communication BA 709 Cognac-Châteaubernard barbara.le-prat@intra.def.gouv.fr ■

ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ET REMISES DES GRADES 3AF

par Bruno Chanetz, rédacteur en chef



PREMIÈRE PARTIE DE L'AG (16H - 17H30)

Cette Assemblée Générale s'est déroulée dans les locaux de l'Aéroclub de France à partir de 16h. Le Président Michel Scheller a ouvert la séance puis a cédé la parole à Louis Le Portz, Secrétaire Général.

Louis Le Portz, a présenté le rapport moral relatif à l'année 2018. Il a fait intervenir successivement :

- Bruno Chanetz, Président du Haut Conseil Scientifique
- Jacques Gatard, pour le Comité de pilotage des commissions techniques
- Jean-François Coutris, Président du Comité de pilotage des groupes régionaux
- Olivier Martin, Président du Groupe d'ingénierie et de planification des colloques
- Iñaky Garcia-Brotons, en charge de l'observatoire du numérique
- Philippe Boulan, Président de la commission ressources humaines
- Pierre Bescond, Président du comité des affaires internationales

Après le vote du rapport moral, Bertrand Petot, trésorier, est intervenu pour faire voter le rapport financier en rappelant la décision de l'Assemblée de recourir aux services d'un commissaire aux comptes : Jérôme Arenes, de la société NAOLYS.

Louis Le Portz a ensuite expliqué les mouvements ayant eu lieu au Conseil d'Administration suite à la démission de certains membres ; il demandait à l'AG d'approuver le remplacement de Bernard Vivier par Jean-François Coutris (collège 1) et de Bernard Moretti, IPSA par Xavier Barral, APA (collège 3).

REMISE DES GRADES ET DÉCORATION (17H30 - 20H00)

L'Assemblée générale ayant été suspendue pour permettre le déroulement de la cérémonie de remise des Grades 3AF.

Les grades seniors ont été conférés à :

Malik Ababsa, Jean-Christophe Antoni, Claudine Besson, Bernard Decre, Jean-Pierre Dedieu, Anne Denquin, Yannick Devouassoux, Marie Gaudre, Denis Gely, François-Xavier Giraud, Isabelle Hamon, Jean-Philippe

Harcaut, Jean Bernard Itier, Louis Jezequel, Benoît Legattu, Philippe Le Cleach, Nathalie Nogueira, Dominique Nouailhas, Philippe Perrier, Dominique Ribereau, Yves Roncin, Pierre-André Roth, Erik Steenbakker.

Les grades émérites ont été conférés à :

Nicolas Berend, Véronique Cham-Meilhac, Philippe Clerc, Erick Jean Louis Lansard, Michel Mahe, Olivier Martin, Yvon Millet, Bertrand Petot, Pascal Traverse, Anne Venables, Alain Wagner.

Cette cérémonie a été suivie de la remise du grade d'Officier dans l'Ordre national du Mérite à Bertrand de Montluc par Michel Scheller. Bertrand de Montluc est membre de la Commission stratégie et affaires internationales, dont il a été le président. Il est membre du comité de rédaction de la Lettre 3AF et du Haut Conseil Scientifique de la 3AF.



Bertrand de Montluc

Cette partie de l'AG s'est terminée par une courte et émouvante cérémonie exprimant les remerciements de l'Association à Anne Venables qui quitte ses fonctions de Secrétaire exécutive.

SECONDE PARTIE DE L'AG (20H - 20H15)

A 20h00, le Président ayant repris la séance, annonce les résultats du vote relatif au renouvellement des membres du Conseil d'Administration. Le nouveau Conseil d'Administration élu est composé des membres suivants :

Membres de droit

- Odile Cherel
- François Cote
- Pierre Trefouret

College 1

- Pierre Bescond
- Jean-François Coutris
- Louis Le Portz
- Alain Marcheteau
- Christian Mari
- Michel Polacco
- Jacques Sauvaget

Collège 2

- Pierre-Guy Amand
- Christian Breant
- Iñaky Garcia-Brotons
- Robert Lafontan
- Olivier Martin
- Bertrand Petot
- Philippe Rostand

College 3

- Xavier Barral
- Marc Bellenoue
- Pierre Bourlot
- Franck Cazaurang
- Olivier Chansou
- Olivier Lesbre
- Bruno Sainjon

Ce nouveau CA s'est aussitôt réuni pour désigner les membres du bureau :

- Louis Le Portz, président
- Jacques Sauvaget, secrétaire général
- Robert Lafontan, vice-président
- Bruno Sainjon, vice-président
- Bertrand Petot, trésorier



Louis Le Portz, Président 3AF

Ingénieur l'ENSICA (1964), Président-directeur Général de sociétés au sein des groupes Crouzet, Thalès, Safran, Commissaire général du Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace du Bourget de 2003 à 2011. De 2005 à 2010 il est Président de la société VIGNAL-ARTRU INDUSTRIES puis Président de la société PACK'AERO. Président de la commission Aviation générale de l'Aéro-Club de France de 1977 à 1983. Secrétaire général de l'Aéro-Club de France de 1978 à 1983 et de 2003 à 2005. Chevalier de la Légion d'honneur, Chevalier de l'Ordre national du Mérite, Médaille de l'Aéronautique en 1982, Médaille de l'Aéro-Club de France en 1996, Fellow of the Royal Aeronautical Society, Membre d'honneur du GIFAS. Président de la Commission innovation technologique de l'Aéroclub de France



Bruno Sainjon, vice-président 3AF

X 82 et ENSTA 87, il a occupé plusieurs postes au sein de la DGA dont celui de directeur des opérations, de janvier 2009 à mai 2014. Au sein des services du Premier ministre, il a été de mars 1996 à juin 1997 directeur des affaires économiques et de l'animation de la délégation interministérielle à la coupe du monde de football de 1998. Il a également été directeur adjoint des technologies et transferts sensibles du Secrétariat général de la défense nationale (SGDN) d'août 2003 à septembre 2005. Conseiller technique, puis conseiller pour les affaires économiques, financières et budgétaires du Ministre de la défense de juillet 1997 à février 2000. De mars 2000 à décembre 2002, directeur de la stratégie et du développement du domaine «matériaux énergétiques» du Groupe SNPE. Il a occupé simultanément les fonctions de PDG de CELERG et CELERG International (devenu Roxel) de mai 2001 à mai 2002, et de secrétaire du Comité exécutif de SNPE de février à novembre 2002. Depuis le 30 mai 2014, Bruno Sainjon est Président-directeur général de l'ONERA. Il est Commandeur de l'Ordre national du Mérite et Officier de la Légion d'honneur.



Jacques Sauvaget, Secrétaire général 3AF

Ingénieur de l'ENSICA, débute sa carrière à la DGA en 1978. Intégrant le corps des Ingénieurs de l'armement en 1985, il est nommé directeur du programme Transall Gabriel, destiné à l'armée de l'Air. De 1988 à 1991, il est au Service central des affaires industrielles. De 1991 à 1994, il est à la direction des affaires internationales. En 1994, il est nommé sous-directeur des affaires industrielles et internationales au service central des affaires industrielles. De 1999 à 2002 il dirige le Centre d'essais des propulseurs (CEPr) de Saclay. De 2003 à 2005, il est sous-directeur de la coopération et de l'action commerciale à la direction des centres d'expertise et d'essais. Il est promu Ingénieur général de l'armement le 1er octobre 2003. De 2005 à 2008, il est auprès du directeur des relations internationales chargé du contrôle des programmes export. Fin 2008, il rejoint la 3AF comme délégué général en charge du rayonnement. Il y restera jusqu'à fin 2016.



Michel Assouline, directeur général 3AF

Ingénieur de l'Ecole Centrale de Paris (83), DEA de Mécanique des Fluides (1983), Administrateur Qualifié Indépendant (2011), Green Belt Lean Six Sigma (2015). Après un début de carrière au Commissariat à l'énergie atomique, Michel Assouline rejoint le cabinet de Conseil en stratégie Mars & Co, puis intègre Thales en 1990 en qualité de directeur du business développement au sein de la holding Thomson SA. En 1992, il prend la direction générale de Thomson-CSF Sécurité, filiale de Thomson-CSF dont il assure le redressement. Il rejoint ensuite le secteur Audiovisuel en qualité de directeur général d'une chaîne de TV thématique allemande du groupe AB Productions. En 2004, il est recruté par Météo-France où il prend la direction des activités commerciales et de la communication. A partir de 2014, il prend en charge l'Innovation et les Partenariats auprès de la direction générale de Météo-France. Lors de la COP21, il met en place le premier hackathon du Ministère de l'Environnement sur le thème du changement climatique. Il contribue en 2016 à la mise en place du dispositif national GreenTech verte, fonde et dirige l'incubateur de start-ups installé sur le site Toulousain de Météo-France. En parallèle, il assure des missions de Conseil notamment au service des startups dans le domaine du développement durable. Passionné d'aviation, Michel Assouline est également titulaire d'un brevet de pilote privé VFR. ■

LE GROUPE ILE-DE FRANCE DE 3AF

par **Paul Kuentzmann**, président, **Patrick Gilliéron**, vice-président et **Gérard Laruelle**, vice-président

Le groupe Ile-de-France de 3AF présente des caractéristiques paradoxales. D'une part, l'Ile-de-France rassemble à peu près la moitié des adhérents individuels et collectifs de 3AF. D'autre part, le groupe IdF n'arrive pas à mobiliser ses adhérents pour développer une dynamique ambitieuse : par exemple il n'y a aucun membre actif des industriels franciliens dans le bureau, malgré plusieurs relances. Aussi, la stratégie adoptée par le bureau IdF se restreint-elle à la mission première de 3AF, la diffusion de la culture aérospatiale.

UN BUREAU RÉDUIT

Le bureau IDF fonctionne avec un nombre limité de personnes : 4 si l'on s'en tient à celles qui participent à toutes ses réunions. Il s'agit en fait de fidèles de 3AF qui ont largement dépassé l'âge de la retraite :

- Paul Kuentzmann, président, retraité, aussi impliqué dans différentes commissions techniques et comités.
- Patrick Gilliéron, vice-président, retraité, aussi impliqué dans différentes commissions techniques.
- Gérard Laruelle, vice-président, retraité depuis 2013, président du comité Jeunes et correspondant de la Mairie de XVe. Membre de la commission aérodynamique.
- Fanny Boucher, retraitée, trésorière.

Cinq autres personnes participent occasionnellement aux réunions de bureau (Nicolas Bérend et/ou Bruno Chanetz, ONERA) et/ou fournissent ponctuellement des aides à la rédaction (Sophie Plazanet), à la mise en page (Sophie Plazanet et/ou Clémentine Chevalier), à la relecture (Francis Hirsinger) ou de certains articles ou documents (Gazettes et Recueil des Gazettes).

Les réunions du bureau IDF ont lieu généralement à l'ONERA Palaiseau. Ce lieu a été choisi parce qu'aucun adhérent collectif ne s'est proposé pour accueillir ces réunions et parce qu'il limite le temps de transport des membres permanents. C'est le président qui rédige les comptes rendus.

LES ACTIVITÉS D'IDF/3AF

Les activités d'IdF sont de trois types :

- des conférences du soir ;
- des ateliers ;
- des actions Jeunes.

Conférences du soir

Deux types de conférences : celles données à l'initiative d'IdF (sept à huit par an), qui ont lieu à la Mairie du XVe de Paris, celles données par la commission technique

Propulsion, en liaison avec le groupe IdF (deux à trois par an), qui se tiennent Salle de l'Espace du CNES aux Halles.

Les conférences données à l'initiative d'IdF font l'objet d'une programmation annuelle, en accord avec la Mairie du XVe. Cet arrondissement de Paris se veut le plus aérospatial de la capitale et met donc gratuitement à disposition de IdF/3AF des salles (contenance jusqu'à deux cents personnes). Grâce à un outil informatique (Sendinblue), la diffusion des annonces de conférence est large. Les personnes intéressées doivent obligatoirement s'inscrire. Cette manière de procéder est devenue opérationnelle et l'assistance atteint maintenant régulièrement 100 personnes. Cette assistance comprend des habitants du XVe, des membres 3AF et des non-membres 3AF, que l'on essaye de faire adhérer à 3AF, surtout des étudiants (succès limité). Il est aussi d'usage d'inviter après la conférence le conférencier à dîner. Les frais de déplacement des conférenciers non franciliens sont remboursés. Compte tenu que la dotation IdF a tendance à diminuer, il est prévu de limiter le nombre de conférenciers non franciliens à un par semestre.

Les conférences préparées par la commission technique Propulsion ont lieu à la Salle de l'Espace du CNES. Elles bénéficient de la diffusion par Sendinblue mis en place par IdF

Une originalité des conférences franciliennes est qu'elles bénéficient toutes d'un résumé d'environ quatre pages, qu'elles soient à l'initiative d'IdF ou à celle de la commission technique Propulsion. Tous les deux ans, ces résumés font l'objet d'un recueil ; le quatrième recueil est en préparation. Ces recueils sont majoritairement distribués par voie électronique, un petit nombre est imprimé pour les membres 3AF encore réfractaires à la bureautique.

Il a été observé ces dernières années que le nombre de conférences en Ile-de-France tendait à croître : conférences AAE (l'après-midi), conférences IESF, conférences Alumnis, conférences de Jeunes, etc. et ce sans aucune coordination. Il faut se rendre à l'évidence : 3AF ne possède plus l'exclusivité des conférences.

Ateliers franciliens

3AF organise des symposiums sur des thèmes généraux en Ile-de-France, en Province ou dans des pays limitrophes. Le coût d'inscription à ces symposiums n'est plus à la portée des retraités et des Jeunes, ceux qui peuvent s'inscrire sont essentiellement des actifs pris en charge par leurs sociétés. L'idée a donc germé, d'une part, de créer des ateliers « low cost » d'une journée et, d'autre

part, de rapprocher de 3AF des populations aéronautiques qui en sont encore éloignées. Deux ateliers ont eu lieu ou sont en cours de préparation :

- l'atelier JAL, qui a eu lieu le 27 septembre 2017 à l'amphithéâtre de la DGAC ;
- l'atelier JAL2, qui a eu le 2 octobre 2019 sur l'aérodrome de Toussus-le-Noble.

Ces deux ateliers ont été orientés Aviation Légère et ont reçu le soutien de la DGAC, de la FFA et du RSA. Il est possible d'imaginer des ateliers visant d'autres secteurs aérospatiaux dans la mesure où il est possible de trouver un ou des partenaires pour garder le caractère « low cost » de ces ateliers.

2.3. Activités Jeunes

Le Comité Jeunes a pour mission d'accompagner les jeunes jusqu'à environ une trentaine d'années : motivation des élèves pour le secteur aérospatial, conseils pour la formation des étudiants, aide à l'embauche et conseils pour l'intégration en entreprise. Diverses actions sont menées dans les Groupes en région ; la coordination en central est fort difficile, c'est plutôt de l'échange d'informations. En ce qui concerne la région Ile-de-France, la situation est critique pour de multiples raisons : dimensions de la région, temps libres / horaires des jeunes pour se rencontrer et multiples activités au sein des écoles (sans se déplacer !!). En pratique, le Président travaille beaucoup pour les jeunes, souvent seul ou avec l'aide d'autres associations ou écoles. Une des rares actions réussies au sein de la 3AF est le stand de l'association au salon du Bourget en 2017 ; G Laruelle en a été l'organisateur et des jeunes 3AF se sont relayés pour assurer une permanence totale et permettre de multiples contacts pour promouvoir la 3AF. Ce succès a été envisagé pour 2019 mais, pour des raisons budgétaires, 3AF n'a pas retenu de stand au Bourget.

Pour la motivation des jeunes élèves, la concrétisation d'actions envisagées dans le cadre de l'accord avec la mairie du XV^e n'a pu être réalisée au sein de la 3AF qui voulait limiter son champ d'application à l'enseignement supérieur. Cela conduit G. Laruelle à créer une association « sœur » : AALCEF (Association Aérospatiale pour les Lycéens, Collégiens et Ecoliers de France), sorte de vivier pour la 3AF. Il la préside toujours et assure personnellement des actions dans des écoles et collèges du XV^e. Un rapprochement avec 3AF est à envisager.

Pour la motivation des collégiens et lycéens pour le monde aérospatial, G. Laruelle utilise le support informatique d'IESF pour établir les contacts avec les établissements scolaires demandeurs (environ 25 interventions

annuellement).

L'idée de faire faire par des étudiants de lycées techniques une maquette de la soufflerie S1 de Chalais Meudon a été initialisée à la 3AF par G. Laruelle avec l'aide de Bruno Chanetz. Une aide financière de l'association « Aéro Eiffel 100 » avec la DGAC, a permis en 5 ans de la terminer et de l'exposer, avec l'aide du GIFAS, au salon du Bourget 2019. Elle est revenue à la soufflerie Eiffel, à Paris, pour y être exposée en permanence.

La soufflerie EOLIA est maintenant gérée par le Groupe poitevin et il existe aujourd'hui plus de 25 clones en France (et une en Belgique).

Une forte communication des Mardis Aérospatiaux à la mairie du XV^e vers les écoles d'ingénieurs et universités franciliennes a permis d'accroître la participation des jeunes. Cela a également permis de rencontrer Pierre Cordesse qui finit une thèse à l'ONERA. Vivement intéressé par le Comité Jeunes, il s'est déjà fortement impliqué pour introduire 3AF dans de récentes manifestations internationales (avec succès).

3. SYNTHÈSE

Le groupe IdF de 3AF doit être considéré comme fragile puisque reposant pour l'essentiel sur le travail bénévole de quatre retraités. Aucun membre de sociétés industrielles franciliennes ne participe aux réunions du bureau IdF. Il est à craindre que l'existence du groupe IdF soit complètement ignorée de la hiérarchie de ces sociétés. Contrairement à d'autres groupes bénéficiant de subventions des villes les accueillant, IdF ne peut compter que sur la bienveillance de la Mairie du XV^e.

Plus généralement, il est utile de se projeter dans l'avenir. La société change et il est impossible d'infléchir le cours de cette évolution. Cette évolution peut être caractérisée par trois tendances : le développement des réseaux sociaux, la généralisation du « Jeunisme » (les Jeunes vont trouver rapidement des solutions économiques à de vieux problèmes ? Ceci en dit long sur la démission des générations précédentes), la priorité donnée à l'espace par rapport à l'aéronautique (un non-sens économique). Peut être la solution est-elle que les Jeunes s'impliquent plus dans le bureau IdF plutôt qu'ils inventent de nouvelles entités venant concurrencer les travaux de la 3AF.

De toute façon, si rien ne change, le groupe IdF finira par disparaître par « érosion naturelle ». ■

INTERVIEW DE JEAN-YVES LE GALL, PRÉSIDENT DU CNES

Par Jean-Pierre Sanfourche et Bertrand de Montluc, Chargés de mission à la 3AF



Jean-Yves Le Gall

Jean-Pierre Sanfourche et Bertrand de Montluc :
Monsieur le président, nous vous avons communiqué récemment un mémorandum exprimant un certain nombre de propositions que nous formulons en vue de donner un nouveau souffle à notre Association Aéronautique et Astronautique de France. Nous souhaiterions recueillir vos commentaires sur ces propositions et vos conseils. Voici brièvement résumées ces propositions :

Proposition n° 1 - Fournir des services à haute valeur ajoutée aux décideurs du domaine aérospatial :

- des études (« Position Papers ») donnant un point de vue éclairé sur les grands sujets du moment ;
- de telles études - à mener un peu dans le style « Institut Montaigne » ou « Sénat » - exigent la mise en place de Groupes ad hoc, en fait des « Think Tanks » réunissant, non seulement des membres de la 3AF, mais aussi des experts appartenant aux institutions ou à l'industrie de manière à fournir in fine des rapports de haut niveau et dont l'indépendance et l'objectivité ne puissent être contestées ;
- des colloques : oui, mais pour seulement en vue d'organiser des échanges de points de vue à l'occasion de la parution d'un Position Paper.

Proposition n° 2 - Fournir des services à haute valeur ajoutée aux ingénieurs et chercheurs du domaine aérospatial :

- des études de synthèse faisant le point sur l'Etat de l'Art dans les grandes disciplines scientifiques et techniques ;
- des colloques parfaitement organisés et donnant lieu à des Actes qui soient de qualité comparable à ceux de l'AIAA par exemple.

Proposition n° 3 - Organiser des lieux de rencontre pour managers : par exemple, reprendre les « Dîners de l'Espace » que M. Michel Bignier (ancien Directeur Général du CNES, ancien Directeur des Systèmes de Transports Spatiaux à l'ESA, ancien Président de la 3AF) organisait deux fois par an au Cercle National des Armées, avec chaque fois un sujet d'actualité présenté par un conférencier.

Proposition n° 4 - A l'intention des étudiants en aérospatial et des jeunes professionnels : organiser des conférences du soir (durée 1h30) à la manière des « Lectures » de la RAeS.

Proposition n° 5 - publication d'articles par des managers et des ingénieurs du CNES, des laboratoires spatiaux du CNRS et des industriels spatiaux dans la Lettre bimestrielle de la 3AF.

Proposition n° 6 - Poursuivre et accentuer la participation de la 3AF à l'initiative FEDERATION.

Jean-Yves Le Gall : Etant très attaché au bon fonctionnement des Sociétés savantes et tout particulièrement de l'Association Aéronautique et Astronautique de France, j'ai lu avec beaucoup d'intérêt les propositions que vous m'aviez fait parvenir et dont vous venez de rappeler brièvement les grandes lignes.

Je ressens tout d'abord très vivement la nécessité pour la 3AF d'établir un plan à moyen terme pour véritablement lui donner un second souffle : un PLAN TRIENNAL DE DEVELOPPEMENT ET D'INNOVATION.

Si vous le voulez bien, je vais tout d'abord m'exprimer sur ce sujet après quoi je reprendrai une à une vos six propositions.

Je peux vous donner, à titre d'exemple, ce que j'ai fait en tant que président de l'IAF (International Astronautical Federation) lorsque j'ai été élu président de cette institution: « L'agenda 2016-2019 de l'IAF : les 3G ».

Parmi les points que comprenait cet agenda figuraient notamment :

- Promouvoir la diversité « 3G » : Genre (objectif : augmenter la proportion femmes/hommes dans la fédération) - Génération (reconnaître et valoriser l'enthousiasme des jeunes) - Géographie (exploiter la diversité géographique) ;
- Faire évoluer l'International Astronautical Congress (IAC) afin de favoriser sa croissance ;
- Organiser encore plus de conférences régionales ;
- Renforcer les relations avec les organisations partenaires de l'IAF ;
- Faire évoluer la structure de financement de l'IAF ;
- Préparer l'avenir de l'IAF au travers de projets innovants.

À l'issue de mon mandat de trois ans, j'observe avec satisfaction que l'institution IAF a bien progressé dans les directions que j'avais indiquées.

C'est pourquoi, fort de cette expérience réussie, je conseille à la 3AF de s'engager sans tarder dans l'élaboration d'un plan à trois ans de développement et d'innovation. Un tel plan, fixant des objectifs réalistes et des dates-clés à respecter, constituerait un efficace conducteur d'actions. La 3AF pourrait tout à fait s'inspirer de la conception de l'Agenda 2016-2019 que j'avais mis en place à l'IAF.

J'en viens maintenant à vos propositions.

Proposition n° 1

Je souscris pleinement à votre proposition n° 1. Il faut programmer des études ciblées sur des thèmes forts, choisis parmi les plus stratégiques du moment et pour lesquels les décideurs ont besoin d'être éclairés par des études documentées et de grande objectivité. Faut-il pour cela organiser chaque fois un grand colloque ? Je ne le crois pas. Pour traiter un thème, il faut constituer une cellule de réflexion (« think tank ») dont le leader vient présenter les conclusions lors d'un exposé devant un auditoire de décideurs concernés à l'occasion d'une réunion courte, de l'ordre d'une heure séance de questions-réponses, incluse. On peut faire cela en organisant un « luncheon » simple, en fin d'après-midi, un peu à la manière de ce qui se pratique en Allemagne. Je cite également l'exemple des Etats-Unis où est organisée chaque semaine une séance d'une heure rassemblant des personnalités de très haut standing sur un thème précis. Etre performant tout en économisant le temps, voilà ce qu'il faut viser. Le temps est notre ressource la plus précieuse, aussi sa gestion doit-elle être rigoureuse. Si l'on veut obtenir la participation de cadres de haut niveau à nos travaux, il faut avoir le souci permanent d'économiser leur temps.

S'agissant de la communication, chaque exposé devrait faire l'objet d'un texte relativement court et bien charpenté qui soit diffusé sans attendre, aux destinataires concernés par le sujet traité. Diffusion électronique essentiellement et en temps réel : un compte-rendu imprimé qui paraît plusieurs semaines ou plusieurs mois après la séance de présentation, devenu obsolète, ne sera lu par personne et donc n'aura pas d'utilité.

Proposition n° 2

S'agissant de votre proposition n° 2 relative aux travaux à caractère scientifique et technique « Etat de l'Art », il est évident que la 3AF doit jouer là un rôle de premier plan. C'est une activité que la 3AF conduit depuis toujours avec ses Commissions Techniques dont les travaux se concrétisent par d'importants colloques. Je verrais là aussi une nette inflexion dans la manière de travailler. Plutôt que de « grands » symposiums de trois jours, je verrais des ateliers de réflexion (« workshops ») d'une demi-journée ou d'une journée maximum, concentrés chaque fois sur un sujet précis et qui s'adresserait à un public restreint constitués uniquement d'experts spécialistes du sujet traité. Ainsi gagnerait-on sur deux points : 1) augmentation du nombre de sujets traités, donc une plus grande dynamique avec élargissement de notre spectre d'actions ; 2) établissement, dans le cadre de la 3AF, de relations avec un grand nombre d'experts de haut niveau dans les différents domaines scientifiques et technologiques du domaine aérospatial. Ces ateliers pourraient remplacer progressivement les grands colloques dispendieux qui nécessitent un gros travail d'intendance.

La communication des résultats de ces ateliers suivrait les mêmes principes que précédemment : par voie électronique et en temps réel, adressée uniquement aux spécialistes concernés. Vous citez en exemple les « Proceedings » en version imprimée de l'AIAA : cela se fera de moins en moins, le ZERO PAPIER doit devenir un objectif prioritaire. Regardez mon bureau : il n'y a pratiquement aucun papier, je ne travaille qu'à l'ordinateur et au smartphone !

L'INDISPENSABLE TRANSITION NUMERIQUE DE LA 3AF

Si je reconnais la grande qualité de ses travaux, le temps est maintenant venu pour la 3AF d'entamer sa transformation numérique. Je dis bien transformation et non révolution, car il faut faire coexister pendant plusieurs mois le schéma actuel de gouvernance et la mise en place progressive du numérique.

Quelques propositions pour opérer ce changement de culture :

- développer un site 3AF extrêmement attractif sur le Web ;
- constituer des Réseaux Sociaux par Sujet afin de mettre en relation par Internet les experts concernés ;
- concevoir et mettre en place des dispositifs permettant aux décideurs et aux ingénieurs de suivre l'actualité 3AF sur des réseaux sociaux, de mise en relation par affinité : linkedin, facebook.com, comptes twitter
- mettre en place un accès réglementé aux publications 3AF (« Position Papers » et Points Techniques) sur Internet ;
- développer les vidéos et clips via youtube.com/

C'est comme cela que la 3AF attirera un nombre sans cesse croissant d'adhérents et particulièrement les jeunes acteurs du monde aérospatial qui ont grandi et grandissent dans le monde Internet.

Proposition n° 3

J'ai bien connu les Dîners de l'Espace de Michel Bignier, ils étaient à l'époque très appréciés, mais je ne pense pas qu'ils seraient aujourd'hui adaptés à nos besoins et contraintes. Ne serait-ce encore une fois qu'en raison du facteur « temps » : il est de plus en plus difficile de réunir de hautes personnalités de 20 heures à minuit. Les réunions « ciblées », courtes et fréquentes, réunissant les décideurs et experts sur un sujet prennent le pas sur les anciennes pratiques.

Proposition n° 4

Oui, tout à fait. J'encourage vivement la 3AF à organiser des conférences d'une heure/une heure et demie à la manière des « Lectures » de la Royal Aeronautical Society (RAeS). D'étroites relations de coopération pourraient être établies avec les professeurs des Grandes Ecoles et Universités.

Proposition n° 5

Oui, j'ai demandé à Pierre Tréfouret, mon Directeur de cabinet, de mettre en route le processus : régulièrement, le CNES proposera un article à paraître dans la Lettre 3AF.

Proposition n° 6

L'initiative FEDERATION est en voie de concrétisation et je tiens à remercier la 3AF pour le soutien qu'elle y a apporté dès le début, en 2017. Je l'encourage à continuer et amplifier sa participation à ce très beau projet « Réseaux et Intelligence Collaborative » qui se place tout à fait dans le contexte actuel de la révolution numérique.

EN CONCLUSION

Mes propositions se résument en trois points :

- établir un Plan Triennal de Développement et d'Innovation : un agenda précis d'actions comportant une sélection des thèmes d'étude, des étapes-clés à respecter et les principes généraux de la transformation des méthodes de gouvernance ;
- passer progressivement de la méthode des grands colloques à la méthode des réunions courtes et ciblées (thème précis) réunissant seulement les experts concernés ;
- entreprendre sans tarder la transformation numérique et la pratique des Réseaux Sociaux.

Tout cela devrait se faire sans entraver le cours actuel des activités de la 3AF, dont je tiens à souligner ici la haute tenue, donc avec détermination mais aussi avec pragmatisme et en organisant de larges concertations. ■

SCIENCES ET TECHNIQUES DANS VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE, VINGT MILLE LIEUES SOUS LES MERS ET LEUR PLUS FAMEUSE ADAPTATION AU CINÉMA

par Jacques Peter, ONERA, membre d'Alumni-ONERA

Voyage au centre de la Terre (1864) et *Vingt mille lieues sous les mers* (1869-70) sont deux des plus célèbres romans de la série des Voyages Extraordinaires. Jules Verne était engagé par contrat avec son éditeur, Pierre-Jules Hetzel, à livrer deux (puis trois) volumes par an pour cette série dans laquelle seraient « *résum[ées] toutes les connaissances géographiques, géologiques, physiques, astronomiques, amassées par la science moderne et refai[te] sous la forme attrayante et pittoresque qui lui est propre, l'histoire de l'univers* ». Cette liste de quatre disciplines ne rend compte ni de l'ensemble des connaissances livrées par l'auteur (aussi féru d'histoire, de mécanique, de construction navale...) ni de la surprenante variété des passages dans lesquels interviennent les mentions scientifiques et techniques : cœur du récit, traits d'humour, descriptions poétiques, réflexions écologiques¹ ou philosophiques, mentions des bienfaits de l'électricité teintées de merveilleux. L'objet de ce texte est tout d'abord d'illustrer et discuter cette surprenante variété à partir d'extraits des deux romans.

Comme nombre des *Voyages extraordinaires*, ces deux récits ont été plusieurs fois adaptés au cinéma. La plus fameuse adaptation de *Voyage au centre de la Terre* est un excellent film de Henry Levin (même titre, 1959) avec James Mason dans le rôle du professeur de géologie. L'adaptation la plus notoire de *Vingt mille lieues sous les mers* est un film très plaisant de Robert Fleisher (même titre, 1954) avec James Mason (Nemo), Peter Lorre (Conseil) et Kirk Douglas (Ned Land). On donne quelques points de repère sur ces films et discute de ce qu'ils gardent de la riche matière scientifique et technique des romans.

SCIENCE ET TECHNIQUE DANS VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE (JULES VERNE, 1864)

Rappelons brièvement l'argument du livre : Otto Lindenbrock, professeur de minéralogie à Hambourg, découvre un texte crypté écrit par un alchimiste islandais du 16^e siècle. Son neveu et préparateur, Axel, l'aide à

décoder le message qui indique, dans le cratère d'un volcan islandais, l'entrée d'une voie menant au centre de la Terre. L'impatient professeur décide aussitôt d'entreprendre cette expédition avec Axel qui quitte à regret son aimée, Graüben, qui lui promet de l'épouser à son retour du voyage. Lindenbrock, Axel et Hans, un robuste paysan islandais, échappant à mille périls, parcourent cette voie souterraine qui les mène en divers lieux souvent merveilleux (champ de champignons géants, mer souterraine, forêt tertiaire, plaine couverte d'ossements...). Après deux mois de pérégrinations, les trois explorateurs retrouvent l'air libre, expulsés par un mouvement d'eau hors d'une des cheminées du Stromboli.

Dans ce roman d'aventures souterraines, les mentions scientifiques sont d'abord géologiques, contribuant à la description des paysages parcourus - *L'Islande, absolument privée de terrains sédimentaires, se compose uniquement de tufs volcaniques, c'est à dire d'un agglomérat de pierres et de roches d'une texture poreuse... (chap.15)* - puis des grottes et couloirs traversés par les explorateurs. Le processus d'enrichissement du récit par le savoir use aussi de mentions ethnographiques, astronomiques, historiques et préhistoriques, notamment, fruit de l'important travail documentaire auquel se contraignait Jules Verne. Il serait faux cependant de penser que le souci d'apprendre à ses lecteurs prime sur le désir de créer un récit prenant. C'est une évidence pour cette histoire dont plusieurs chapitres relèvent de la littérature fantastique. Cela se manifeste aussi dans les discussions récurrentes (*chap. 6, 17, 18, 25, 34, 45*) sur la température et la pression sous terre : *Il est parfaitement reconnu que la chaleur augmente environ d'un degré tous les soixante pieds de profondeur au-dessous de la surface du globe [...] il existe au centre [de la Terre] une température qui excède deux cent mille degrés (chap. 6)*. On sent là Jules Verne pris entre le désir de ne pas tromper le lecteur (températures et pressions trop hautes pour que le récit soit vraisemblable. Point de vue cité, exprimé par Axel) et celui de narrer une aventure vraiment hors-du-commun (doutes sur ces données exprimés par le professeur Lindenbrock).

¹ Le terme écologie a été formé par un biologiste allemand, Ernst Haeckel, en 1866 pour désigner l'étude du rapport entre les individus d'une espèce, l'activité organisée de cette espèce et l'environnement de cette activité. Il est alors exempt de connotation de militantisme politique. Par les inquiétudes qu'il manifeste quant aux conséquences des altérations de la nature par l'Homme, Jules Verne est un précurseur des écologistes contemporains.

CULTURE

SCIENCES ET TECHNIQUES DANS VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE, VINGT MILLE LIEUES SOUS LES MERS ET LEUR PLUS FAMEUSE ADAPTATION AU CINÉMA

Les mentions savantes, cependant, n'interviennent pas exclusivement pour densifier et préciser le cœur du récit. Le vocabulaire savant ou technique se glisse notamment dans des descriptions discursives très lyriques, comme celle des colonnes naturelles du fjord de Stapi : *Ces fûts droits et d'une proportion pure supportaient une archivolte, faite de colonnes horizontales dont le surplombement formait demi-voûte au-dessus de la mer. À de certains intervalles, et sous cet impluvium naturel, l'œil surprenait des ouvertures ogivales d'un dessin admirable, à travers lesquelles les flots du large venaient se précipiter en écumant. Quelques tronçons de basalte, arrachés par les fureurs de l'Océan, s'allongeaient sur le sol comme les débris d'un temple antique, ruines éternellement jeunes, sur lesquelles passaient les siècles sans les entamer (chap. 14).*

Le savoir se mêle aussi, de deux manières, aux passages humoristiques du roman. Soit ce sont les mœurs des savants qui prêtent à rire ou sourire, comme la manie des personnages de donner leur nom ou celui d'un proche, aux lieux qu'ils découvrent (le Hans Bach, Port Graüben, la mer Lindenbrock, l'Îlot Axel). Soit c'est un personnage cultivé qui qualifie une action ou un trait de caractère par une comparaison ou une métaphore incongrue et savante. Ainsi, le narrateur, Alex, réservé et délicat, s'étonne souvent des allures et furies de son oncle, le rude et impatient professeur Lindenbrock : *Mon oncle à cette lecture, bondit comme s'il eut inopinément touché une bouteille de Leyde (chap. 5) ; Le petit cheval, ployant ses jarrets, se retira des jambes du professeur et le laissa tout droit planté sur deux pierres du rivage, comme le colosse de Rhodes (chap. 12)...*

Le dernier type de passage où nous trouvons des termes scientifiques (à défaut d'arguments en l'occurrence) sont des mentions d'éclairages électriques. Dans d'assez nombreux passages des romans de Jules Verne, des éclairages électriques apparaissent comme sources de bienfaits et de beauté, et sont décrits avec des termes ou expressions s'approchant du merveilleux. Dans *Voyage au centre de la Terre*, excluant la description très positive mais technique de l'appareil de Ruhmkorff (chap. 11), c'est celle de la voûte lumineuse au-dessus de la mer intérieure qui relève de ce registre : *Le pouvoir éclairant de cette lumière, sa diffusion tremblotante, sa blancheur claire et sèche, le peu d'élévation de sa température, son éclat supérieur en réalité à celui de la lune, accusaient évidemment une origine électrique. C'était comme une aurore boréale, un phénomène cosmique continu... (chap. 30)*

VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE, FILM D'HENRY LEVIN 1959

Le film d'Henry Levin est très librement adapté du roman : Le (très peu populaire) professeur Otto Lindenbrock (faible orateur) de Hambourg devient Sir Oliver Lindenbrock professeur à Edimbourg (beau parleur, fort apprécié de ses élèves). Son jeune compagnon d'aventure n'est plus son neveu Axel mais son meilleur élève Alec Mac Ewen, lequel a des vues sur la nièce du professeur, Jenny (tandis qu'Axel Lindenbrock est secrètement fiancé à Graüben, la pupille de son oncle). Arrivé en Islande, le professeur Lindenbrock se découvre deux concurrents (qu'il n'a pas dans le roman) : le professeur suédois Goetaberg et un étrange comte Saknussem, descendant du premier explorateur du centre de la Terre. Après le meurtre de Goetaberg par Saknussem, le professeur entreprend son exploration depuis le volcan Sneffels, flanqué d'Alec Mac Ewen, d'un robuste paysan islandais, de la veuve du professeur Goetaberg, et sous la menace du comte Saknussem.

La distribution du film est remarquable même si seuls James Mason et Pat Boone sont des acteurs (très) connus. Les décorateurs ont créé des lieux souterrains d'une variété et d'une beauté tout à fait remarquables. La réduction du nombre d'épisodes souterrains, l'ajout d'antagonismes et de concurrents (principalement, Lindenbrock versus madame Goetaberg et l'expédition du comte Saknussem) ont contribué au grand agrément de ce film d'aventures.

Cependant, que reste-t-il des nombreuses mentions scientifiques et techniques classifiées ci-avant ? Il s'agit bien sûr d'une matière peu adaptée au cinéma ; elle a, de fait, été très réduite lors du passage du roman au scénario du film. Les indications scientifiques à l'appui du récit se limitent à des mentions géologiques et à la brève description de l'appareil de Ruhmkorff (livre chap.11, film 32'08). Le professeur Lindenbrock est caricatural par son empressement, son obstination, son indifférence pour tout ce qui n'est pas savoir (ou exploration). Son alter ego dans le film, sir Oliver Lindenbrock, est lui aussi passionné par la minéralogie et obsédé par sa future expédition (jusqu'à en oublier un dîner chez lui puis ses cours) mais il n'a pas la rudesse et la sévérité de son modèle. Les scénaristes ont aussi voulu que Lindenbrock et son élève favori, Alex Mac Ewen, soient distraits (adhérant, par là, à un lieu commun de la caricature de savants) et ont inventé plusieurs illustrations amusantes de ce trait de caractère : au début du film, lisant un journal annonçant qu'il a été fait chevalier, Lindenbrock marche au beau milieu d'une formation de musique militaire (3'20) ; peu après (21'20) Alec Mac Ewen demande avec passion à son professeur la permission de l'accompagner au centre de la terre, au moment précis où

SCIENCES ET TECHNIQUES DANS VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE, VINGT MILLE LIEUES SOUS LES MERS ET LEUR PLUS FAMEUSE ADAPTATION AU CINÉMA

il avait promis à Jenny de demander sa main à son oncle ! Jules Verne moque discrètement, tout au long de son roman, la manie des savants d'associer un nom propre (le plus souvent le leur...) à chaque découverte. Les scénaristes du film en ont tiré une courte scène entre Lindenbrook et le comte Saknussem qui vient de découvrir et baptiser de son nom la grande mer intérieure du monde souterrain (1:34'37). Lindenbrook, occupé à ce moment par sa sieste, lui en accorde ensuite le bon droit et le bénéfice.

Il convient encore de noter que le film commence par une chanson en l'honneur de Lindenbrook (entonnée par ses élèves et collègues, 3'40) et se termine par cette même chanson au retour du périple (reprise par tous les étudiants de l'université, 2:3'26) : « *Here is to the prof' of Geology, master of Natural History, Rare boy, he ! And rare boys, we ! To know such a big curiosity [...]* ». Un double hommage joyeux au professeur et à sa discipline encadre ainsi l'aventure. Comme le passage par l'Atlantide ou la lutte contre les dimérodons (deux épisodes ne figurant pas dans le roman), cette éloge gaie du savant et du savoir semble très congruente avec l'univers de Jules Verne. Il semble bien qu'Henry Levin ait su trahir la lettre du roman sans trahir l'esprit de l'écrivain.



L'accès au centre de la Terre : au sommet du Sneffels (film), la descente dans le cratère du volcan (gravure de l'édition Hetzel, Edouard Riou)

SCIENCE ET TECHNIQUE DANS VINGT MILLE LIEUES SOUS LES MERS (JULES VERNE, 1869-70)

Le livre a été publié en 1869 pour la première partie et en 1870 pour la seconde. Tentons, malgré le très grand nombre des péripéties, d'en résumer l'action : en 1866, des navires marchands sont heurtés et souvent coulés par un « monstre », objet ou animal fusiforme et rapide. Un navire militaire américain, *l'Abraham Lincoln*, est affrété pour identifier et anéantir ce monstre. Le professeur Aronnax, naturaliste du Muséum d'Histoire Naturelle, son domestique, Conseil, et un harponneur canadien, Ned Land, se joignent à l'équipage. Après plusieurs mois de recherches infructueuses, leur bateau est précisément heurté par l'objet de leurs recherches. Projetés à l'eau, Aronnax, Conseil et Ned Land échouent sur le dos du monstre qui s'avère être un sous-marin. Ils deviennent dès lors les hôtes et prisonniers de son énigmatique capitaine, Nemo, et contribuent ou assistent à un grand nombre d'expéditions décidées par le capitaine et opérées grâce au Nautilus, son sous-marin : exploration du pôle Sud, parcours de l'Atlantide, plongées sous-marines, explorations d'îles... Peu après la lutte héroïque de Ned Land et de l'équipage contre un gigantesque poulpe, Aronnax, Conseil et Ned Land s'échappent du sous-marin alors qu'il est pris dans un maelstrom.

Les mentions scientifiques et techniques ne sont pas moins nombreuses dans *Vingt mille lieues sous les mers* que dans *Voyage au centre de la Terre*. La plupart d'entre elles, bien sûr, complètent et étayent le récit de voyage et d'aventures. C'est la fonction notamment des chapitres 12 et 13 de la première partie dans lesquels Aronnax transcrit les explications détaillées données par Nemo sur son sous-marin et ses instruments : *Les uns vous sont connus, tels que le thermomètre qui donne la température intérieure du Nautilus ; le baromètre, qui pèse le poids de l'air et prédit les changements de temps ; l'hygromètre, qui marque le degré de sécheresse de l'atmosphère ; le storm-glass, dont le mélange, en se décomposant, annonce l'arrivée des tempêtes ; la boussole, qui dirige ma route... (I chap. 12)*. Ces notations relèvent d'un très grand nombre de disciplines dont l'ichtyologie, la géologie, la chimie, la physique, la médecine, la mécanique et la construction navale. Il est remarquable que plusieurs de ces explications prennent la forme d'un court développement incluant les points acquis, les points discutés par la communauté scientifique, la citation d'un auteur-chercheur actif du domaine et éventuellement la mention d'une expérience (le lecteur intéressé pourra se reporter au développement sur les éponges – *II chap. 4* – ou sur la mer des Sargasses – *II chap. 6*). C'est, bien sûr, donner une fidèle image de l'activité scientifique au jeune lecteur. Cependant, comme on l'a relevé déjà dans §I, la crédibilité scientifique a moins de valeur pour l'auteur que la richesse des aventures. C'est ainsi une mention

CULTURE

SCIENCES ET TECHNIQUES DANS VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE, VINGT MILLE LIEUES SOUS LES MERS ET LEUR PLUS FAMEUSE ADAPTATION AU CINÉMA

bien courte – *Le Nautilus se compose de deux coques [...] réunies entre elles par des fers en T qui lui donnent une rigidité extrême. Grâce à cette disposition cellulaire, il résiste comme un bloc, comme s'il était plein (I chap. 13)* – qui sert à justifier les invraisemblables profondeurs auxquelles le Nautilus se risque (jusqu'à 14000 mètres, II chap. 11).

Parmi l'abondante matière scientifique et technique livrée au lecteur, nous sommes peut-être aujourd'hui particulièrement sensibles aux mentions écologiques. Par la voix du professeur Aronnax, Jules Verne manifeste sa réprobation de la chasse et de la pêche quand, par leurs excès, elles menacent les baleines australes, les phoques, les morses ou les lamantins (II chap. 12, 13, 14, 17). Dans ce dernier chapitre, il relève aussi le dérèglement de la flore marine d'Amérique du Sud dû à l'affaiblissement des populations de lamantins².

Le vocabulaire et les précisions savantes se trouvent aussi dans des énumérations fameuses des poissons vus des baies vitrées du Nautilus. Sous leur forme développée incluant des adjectifs ou des propositions qualificatives – *Là, sous un sol rocheux et volcanique, s'épanouissait toute une flore vivante, des éponges, des holoturies, des cydippes hyalines ornées de cyrrhes rougeâtres et qui émettaient une légère phosphorescence, des beroës, vulgairement connus sous le nom de concombres de mer et baignés dans les miroitements d'un spectre solaire, des comatules ambulantes, larges d'un mètre, et dont la pourpre rougissait les eaux (II chap. 7)* – la fonction de ces énumérations reste ambiguë malgré la grande qualité du style. Au contraire, quand l'auteur multiplie références et métaphores – *Puis, par nuées, apparaissent des surmulets, corsetés de raies d'or de la tête à la queue, agitant leurs resplendissantes nageoires ; véritables chefs-d'œuvre de bijouterie consacrés autrefois à Diane, particulièrement recherchés des riches Romains, et dont le proverbe disait : « Ne les mange pas qui les prend ! » (II chap. 28)* – ou s'en tient à une énumération rythmée – *Nous passions librement sous leur haute ramure perdue dans l'ombre des flots, tandis qu'à nos pieds, les tubipores, les méandrines, les astrées, les fongies, les cariophylles, formaient un tapis de fleurs, semé de gemmes éblouissantes (I chap. 24)* – il n'est pas douteux qu'il veuille écrire les plus belles pages de son roman.

Savoir et savants contribuent aussi à nous faire sourire. Les traits d'humour les plus inattendus se rapportent à la classification des poissons et à la passion de Conseil pour ce domaine : Ainsi, Ned Land reconnaît les poissons mais ne sait pas les classer ; Conseil peut les classer mais ne sais pas les reconnaître. A eux deux, ils forment un naturaliste

de première force (I chap 15)... Une autre série de mentions amusantes a trait au livre du professeur Aronnax « Les Mystères des grands fonds marins ». Juste avant de fuir du sous-marin, dans un moment de grand péril, le professeur saisit un livre dans la bibliothèque de Nemo et le lit pour se calmer. Conseil s'enquiert de cette lecture « *Est-ce intéressant ce que lit Monsieur ? – Très intéressant – Je le crois. C'est le livre de monsieur que lit monsieur ! – Mon livre ?* »

Enfin, pour assurer la correspondance avec les types de mentions scientifiques et techniques relevés en §I, on n'est pas en peine d'argumenter le caractère puissant et presque magique de l'électricité dans *Vingt mille lieues sous les mers*. Présentant son bateau à Aronnax, étonné de la puissance des machines du Nautilus, Nemo se justifie brièvement « *Mon électricité n'est pas celle de tout le monde, et c'est là tout ce vous me permettrez de vous dire* » (I chap. 12). Aronnax, de son côté, ne manque pas de souligner la beauté des paysages marins vus dans les feux du Nautilus – *Lorsque le Nautilus passait entre [ces navires naufragés] et les enveloppait de ses nappes électriques, il semblait que ces navires allaient le saluer de leur pavillon et lui envoyer leur numéro d'ordre ! (II chap. 7)*. Enfin l'électricité a, pour les marins du Nautilus, moult usages inattendus : elle permet de faire venir à soi le sous-marin, de voir pendant les plongées en scaphandre, d'électrocuter des assaillants, de tirer en plongée des balles-condensateurs... Tout cela renforce, bien sûr, le halo de puissance mystérieuse de l'électricité du Nautilus.

La science est encore présente dans trois passages où on ne l'attend guère, des sortes de déclaration d'admiration de Nemo pour la mer (I chap. 10 et 18) et pour son Nautilus (I chap 13). Ainsi dans le premier des chapitres cités : *Oui ! je l'aime ! La mer est tout ! Elle couvre les sept dixièmes du globe terrestre. Son souffle est pur et sain. C'est l'immense désert où l'homme n'est jamais seul, car il sent frémir la vie à ses côtés. La mer n'est que le véhicule d'une surnaturelle et prodigieuse existence ; elle n'est que mouvement et amour ; c'est l'infini vivant, comme l'a dit un de vos poètes. Et en effet, monsieur le professeur, la nature s'y manifeste par ses trois règnes, minéral, végétal, animal. Ce dernier y est largement représenté par les quatre groupes des zoophytes, par trois classes des articulés, par cinq classes des mollusques, par trois classes des vertébrés, les mammifères, les reptiles et ces innombrables légions de poissons, ordre infini d'animaux qui compte plus de treize mille espèces...*

Notons finalement, pour être complet, les compétences des trois personnages savants du roman : Aronnax est

² « Et savez-vous, ajoutai-je, ce qui s'est produit, depuis que les hommes ont presque entièrement anéanti ces races utiles ? C'est que les herbes putréfiées ont empoisonné l'air, et l'air empoisonné, c'est la fièvre jaune qui désole ces admirables contrées. Les végétations vénéneuses se sont multipliées sous ces mers torrides, et le mal s'est irrésistiblement développé depuis l'embouchure du Rio de la Plata jusqu'aux Florides ! »

SCIENCES ET TECHNIQUES DANS VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE, VINGT MILLE LIEUES SOUS LES MERS ET LEUR PLUS FAMEUSE ADAPTATION AU CINÉMA

professeur d'histoire naturelle au Museum et homme de culture ; Conseil est un classificateur passionné ; Nemo, enfin, un homme de grande culture, collectionneur de tableaux de maîtres, amateur de musique et joueur d'orgue, ingénieur - mécanicien - physicien - chimiste concepteur du Nautilus, est encore expert de quelques sujets (la Mer Rouge - II chap. 4- la bataille de Vigo - II chap. 8) et expérimentateur (température et densité de l'eau - I chap. 23).

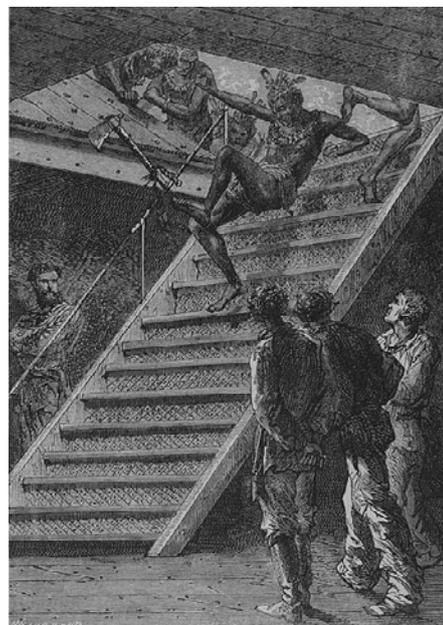
VINGT MILLE LIEUES SOUS LES MERS, FILM DE ROBERT FLEISHER 1954

Le livre contient tant d'épisodes durant la résidence forcée des passagers du Nautilus qu'il faudrait certainement une série et pas un film pour l'adapter fidèlement. De fait, le scénario du film prend de nombreuses libertés avec le roman. Le professeur Aronnax est flanqué de Conseil, son apprenti et non plus son domestique comme dans le livre. Le harponneur Ned Land, taiseux et discret dans le roman, est dans le film un joyeux drille, joueur de guitare et coureur de cocottes. Nemo, maître dans le livre d'une énergie électrique qui n'est pas celle du commun, est, dans le film, découvreur de l'énergie nucléaire. Il hésite à en transmettre le secret à l'humanité et choisit pour finir de faire sauter l'usine nucléaire installée dans sa base. Sa femme et un de ses fils ont été torturés pour le forcer à révéler ses secrets tandis que, dans le livre, le mystère reste très épais quant aux sources de sa misanthropie et de sa haine de certaines nations.

Les scénaristes du film ont retenu certains des épisodes les plus spectaculaires du roman (l'enterrement sous-marin - I chap. 24 - l'île de Gueboroar - I chap. 21,22 - le combat contre le poulpe géant - II chap. 18) et ont ajouté quelques péripéties de leur cru. Presque toutes les activités savantes de Nemo, Aronnax et Conseil, sont omises dans le film, de même qu'a disparu l'essentiel de la très grande bibliothèque du Nautilus. La science n'apparaît plus qu'à travers le cas de conscience de Nemo (doit-il renouer avec l'humanité et transmettre ses connaissances sur l'énergie nucléaire) et quelques éléments de décors et anecdotes inventés par les scénaristes : décidé à se saouler, Ned Land saisit un récipient sur une sorte de chariot expérimental couvert de matériel chimique et biologique et boit l'alcool qu'il contenait. Il avale par mégarde le mollusque qui y était conservé. Conseil ne manque pas alors de lire l'étiquette du flacon et lui précise qu'il s'agissait d'une *Flabellina Oculina*...

Le film classique de Richard Fleisher a été réalisé pour les studios Disney avec une distribution de premier choix incluant James Mason (Nemo), Peter Lorre (Conseil) et Kirk Douglas (Ned Land). C'est sans conteste un film d'aventures plaisant mais, à la fois parce qu'il élimine tout

le contenu scientifique du livre et parce qu'il réduit drastiquement la taille du merveilleux Nautilus, il n'est sans doute pas à voir après avoir lu le livre et vu ses illustrations.



Les indigènes de l'île de Gueboroar attaquant le Nautilus sont repoussés par électrocution (gravure de l'édition Hetzel et film).

CONCLUSION

Mêlées au cœur du récit, aux traits d'humour, aux passages poétiques, aux mentions écologiques et aux confessions intimes des personnages, sciences et techniques sont bien au cœur de l'écriture de Jules Verne. L'intrication de la science et de la littérature ne va pas de soi pour le lecteur du 21^e siècle. Elle est sans doute à relier à une littérature plus ancienne, soit strictement scientifique, telle l'*Histoire Naturelle* de Buffon, soit de vulgarisation, dont des livres de Michelet - *l'Oiseau*, *l'Insecte*, *la Mer* - cités parmi les sources de *Vingt mille lieues sous les mers*. Quoi qu'il en soit, les romans classiques de Jules Verne se lisent toujours avec plaisir. De même qu'on (re) voit avec jubilation les meilleurs films tirés de son œuvre, dont le *Voyage au centre de la Terre* de Henry Levin. ■

LA SAGESSE DE LA PANTHÈRE DE JACQUES PETER AUX ÉDITIONS DE L'HARMATTAN

par Bruno Chanetz, membre émérite 3AF

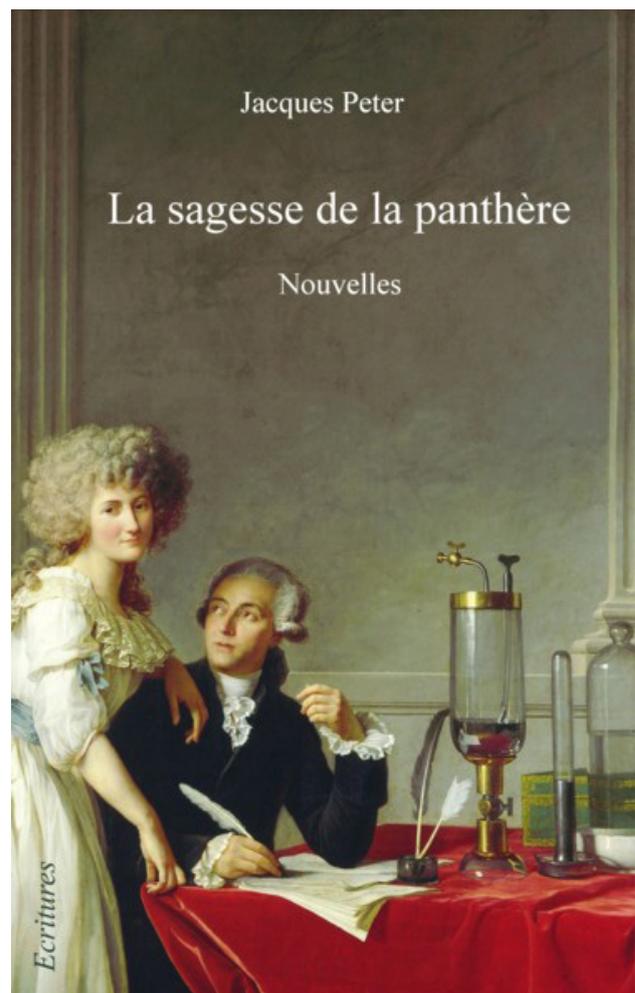
Polytechnicien, Jacques Peter est ingénieur de recherche à l'ONERA. Il est également amateur d'arts graphiques, ce que ne dément pas la belle couverture de son livre reproduisant le double portrait du chimiste Lavoisier et de son épouse par David. Le titre de ce recueil de neuf nouvelles est emprunté à un conte de Marcel Aymé. L'une des nouvelles, au titre éponyme de l'ouvrage, raconte la genèse d'un séminaire donné dans une université parisienne en l'honneur d'un professeur japonais, spécialiste de La Fontaine. La jeune doctorante, commise tardivement à cet office, convoque tous les animaux de la littérature Française depuis *le Roman de Renart* dans une remarquable conférence, qui s'achève par les *Contes du chat perché*, où Marcel Aymé met en scène une panthère, jurant de ne plus manger ni homme ni grande bête depuis qu'elle a appris la géographie. Car qui étudie croit en science bien sûr, en sagacité d'ordinaire et parfois aussi en sagesse. Les bienfaits du savoir, hélas, ne sont pas tout à fait sans revers : un faible pour les jargons, le goût des allégations piquantes sont, parmi quelques autres penchants, de fréquents compagnons de l'érudition.

La psychologie de l'enseignant /chercheur est révélée dans le dernier conte *Les lueurs de la Sebkha* au cours d'une enquête policière digne de Maurice Leblanc dans *l'Agence Barnett : grosso modo, l'estime est fonction croissante des publications. Le top, c'est un livre de référence, beaucoup lu, souvent cité.*

Dans *Les destinées du Cahuachi*, avec une mise en scène, qui rappelle *Tintin et le temple du soleil*, Jacques Peter nous emmène aux sources de la civilisation Nazca. Un éminent professeur, en voyage d'étude, est prêt à commettre un homicide sur un de ses compagnons de voyage, en raison d'un différend relatif à des citations bibliographiques. Le premier reproche au second d'avoir privilégié les travaux mineurs de ses amis au détriment des véritables travaux de référence, qu'il aurait dû citer : les siens. Et le narrateur de rappeler la bonne règle : *une citation s'apprécie en terme comparé de publication et non en raison de relations socio-scientifiques.*

Une autre nouvelle *Les arcanes de Zieffelwart* nous transporte dans les souterrains d'un vieux château allemand, où deux émules d'*Indiana Jones* réussissent à résoudre de difficiles énigmes autour de la vie de Martin Luther, avant de parvenir vivants au tombeau de leur concepteur, un baron huguenot du XVII^e siècle. Au terme de cette quête l'héroïne Ingrid s'interroge : *Et nous que laisserons-nous après nous ?* Olivier, son compagnon lui répond : *des articles, plein d'articles.* Voyant sa partenaire insatisfaite de sa réponse, il ajoute : *Un livre ? Un grand livre sur la Renaissance dans le Saint-Empire.*

Tout en dénonçant les travers très répandus dans son milieu professionnel, Jacques Peter dresse un tendre portrait de ceux qui ont plaisir à savoir, à enseigner et à toujours s'instruire. ■



LES EXOPLANÈTES DE FLAVIEN KIEFER CHEZ DE BOECK SUPÉRIEUR

par **Marie-Claire Coët**, Directrice de l'Information scientifique et technique à l'ONERA, membre sénior 3AF

S'il est un livre qui arrive à point nommé, c'est bien celui-ci ! En effet, les découvertes relatives aux exoplanètes (détection, observation, caractérisation) se succèdent à grand rythme et près de 4000 exoplanètes, découvertes de 1995 à aujourd'hui, sont actuellement recensées et étudiées. Dernier fait marquant : pour la première fois en septembre de cette année, de la vapeur d'eau a été découverte dans l'atmosphère de K2-18b, une super-Terre d'environ huit fois la masse de notre planète et située à plus de 110 années-lumière d'ici. Et comme l'exoplanète K2-18b se trouve dans la zone d'habitabilité de son étoile - cette région où l'eau peut exister à l'état liquide, ce qui est considéré comme la première condition à remplir pour qu'une planète soit susceptible d'abriter une forme de vie - la question extraterrestre, brillamment discutée par Jacques Arnould du CNES, dans la Lettre 3AF n°27 parue il y a deux ans, ressurgit une fois de plus : « Quand bien même il existerait des mondes et des vies extraterrestres, quand bien même il aurait existé, dans le passé de la Terre, des humanités voisines mais différentes de la nôtre, tous, toutes nous restent aujourd'hui encore inconnus et inaccessibles. »

Ancien élève de l'École normale supérieure, docteur en physique théorique, l'auteur du présent ouvrage, Flavien Kiefer, est chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris et à l'Université de Tel-Aviv où il se consacre à la caractérisation des petits corps dans les systèmes extrasolaires, ainsi qu'à la détection de planètes et de naines brunes par la méthode des vitesses radiales. C'est avec pédagogie que Flavien Kiefer, spécialiste des exoplanètes, nous livre ici toutes les clefs utiles à la compréhension de cette quête de mondes nouveaux : rappels sur le système solaire, historique des découvertes et zoologie complète des exoplanètes, panorama de leur diversité, présentation des méthodes de détection et de caractérisation, étude de leurs atmosphères, recherche de la vie ailleurs, etc. Scientifique tout en étant largement accessible, cet ouvrage didactique s'attache à présenter la grande variété et les spécificités des mondes lointains identifiés : Super Jupiters, Exo Jupiters, Jupiters chauds, Neptunes chaudes, mini Neptunes, Exo-Neptune, Super Terres, Exo-Terres, etc. Parfois si différents des planètes solaires.

Un livre à lire absolument, pour s'instruire tout en prenant infiniment de plaisir, afin de savoir où l'on en est aujourd'hui dans la quête d'autres mondes, à l'heure où la science qui progresse à grands pas, nourrit à la fois la fiction et le rêve. ■



ARIANE, UNE ÉPOPÉE EUROPÉENNE DE WILLIAM HUON, PRÉFACÉ PAR JEAN-YVES LE GALL, AUX ÉDITIONS E-T-A-I (AVRIL 2019)

par Bruno Chanetz, membre émérite 3AF

2019 est l'année des anniversaires : 50 ans de Concorde et d'Apollo XI, mais aussi les 40 ans du lancement d'Ariane L01, qui décollait de Kourou le 24 décembre 1979. Ce décollage marquait l'entrée en scène du lanceur européen dans un marché dominé par les Etats-Unis et l'Union soviétique. Mais cette aventure débute dès la fin de la seconde guerre mondiale avec les pionniers français des fusées : le professeur Henri Moureu et le commandant Jean-Jacques Barré. En mai 1946, est créé à Vernon le Laboratoire de recherche balistiques et aérodynamiques (LRBA). Le premier objectif, décliné par Moureau, est de : *bien connaître le V2, être capable de le reconstituer et de le tirer, c'est bénéficier d'un acquis se traduisant par une inestimable économie de temps et de moyen.* En 1950 le programme Véronique - contraction de VERNON-électrONIQUE - est lancé, mais il faut attendre les tirs V16 et V17 en mars 1959 pour atteindre un succès mondial : la découverte de la turbopause entre 100 et 120 kms d'altitude. Le 18 octobre 1963 c'est la chatte Félicette qui culmine à 157 kms d'altitude à bord de la V47. Le retour au pouvoir du général de Gaulle donne une nouvelle impulsion au secteur spatial avec la création en décembre 1961 du Centre national d'études spatiales (CNES). Jacques Blamont en devient le directeur scientifique. En novembre 1965 Diamant A n°1 met en orbite la capsule Asterix, ce qui permet à la France d'accéder au troisième rang des puissances spatiales, à la grande satisfaction du général de Gaulle. Pourtant la suite du programme, avec le lancement en 1966 et 1967 de trois satellites géodésiques Diapason, Diadème 1 et Diadème 2, le laisse glacial. Il déclare en conseil des ministres : *On est en devoir de se demander si l'intérêt de l'expérience répond aux dépenses qu'elle a fait naître.* Ce à quoi Alain Peyrefitte, ministre délégué à la recherche scientifique rétorque : *c'est le propre de toute recherche fondamentale de ne pas répondre à une utilité évidente.*

L'aventure européenne ne démarre qu'avec le programme EUROPA, qui se solde par des échecs, puis le lanceur de troisième génération de substitution LIIS prend le relais. Enfin Ariane paraît, même si ce nom ne fait pas l'unanimité parmi les autres nations, la consonance étant trop voisine de Marianne. Mais la France payant les deux tiers de la note, le nom est finalement adopté.

Quarante plus tard, les lanceurs Ariane continuent de porter avec éclat une réussite technologique et commerciale tenue pour exemplaire. Un succès qu'Ariane 6 aura à charge de prolonger face à une concurrence éclatée où les acteurs historiques sont confrontés aux ambitions des pays émergents et des entreprises individuelles.

Forte d'une documentation souvent inédite et de nombreux entretiens avec les acteurs de cette épopée cette édition enrichie et préfacée par Jean-Yves Le Gall, Président du CNES, fait revivre de la seconde guerre mondiale à nos jours cette extraordinaire aventure humaine. Celle qui poussa l'Europe à effacer ses divisions industrielles et politiques pour se donner un moyen de conserver un accès autonome à l'espace.

L'ouvrage se termine par un tableau indiquant tous les lancements de 1979 à 2018. ■



ÉVÉNEMENTS 3AF

LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS



3AF
Association Aéronautique
et Astronautique de France

OPTRO 2020

9th International Symposium
on Optronics in Defence & Security

OECD • Paris • France • 28-30 January 2020



10th EDITION EUROPEAN CONGRESS

ERTS 2020

EMBEDDED
REAL TIME SYSTEMS

FROM 29th TO 31st JANUARY / TOULOUSE FRANCE
PIERRE BAUDIS CONGRESS CENTER

3AF see



**AerospaceEurope
Conference 2020**

BORDEAUX, FRANCE | 25 - 28 FEBRUARY 2020

CEAS
Council of European
Aerospace Societies

HOSTED BY :

3AF
Association Aéronautique
et Astronautique de France



3AF
Association Aéronautique
et Astronautique de France

55th 3AF International Conference AERO 2020

Poitiers, France - March 23-24-25, 2020



Association Aéronautique
et Astronautique de France

www.3af.fr