



Association Aéronautique  
et Astronautique de France

# LETTRE 3AF

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



**DAVID FRABOULET (MESRI)**  
**ÉMERGENCE DE NOUVELLES**  
**CONCEPTIONS DU TRANSPORT**  
**AÉRIEN ?**



**INTERVIEW DE LUC TYTGAT,**  
**DIRECTEUR DE LA STRATÉGIE**  
**À L'EASA**

## DOSSIER CRISE DU TRANSPORT AÉRIEN

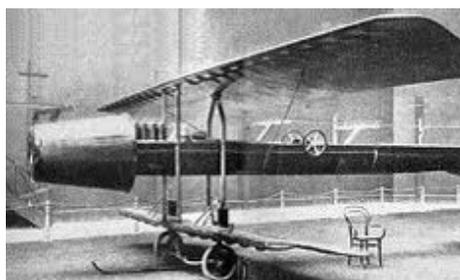


Crédit : Philippe Choy (ONERA)

### Le plan de relance aéronautique à l'ONERA et l'avion à hydrogène



**COMMISSION SIGMA2 : POINTS**  
**DE VUE CROISÉS SUR LES PANS**  
**EN INFRAROUGE ET RADAR**



**LES ORIGINES DE**  
**L'AÉRONAUTIQUE ROUMAINE**



**L'OISEAU BLANC TRAVERSE**  
**L'ATLANTIQUE LES 8 ET 9 MAI**  
**1927**

## 3 ÉDITORIAL

## 4 MESSAGE DU PRÉSIDENT

## INTERVIEW

### 5 LUC TYTGAT, EASA

par Jean-Pierre Sanfourche

## POINTS DE VUE

### 8 AÉRONAUTIQUE POST COVID-19 : LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DIGITALES SERAIENT ELLES-EN MESURE D'AIDER À L'ÉMERGENCE DE NOUVELLES CONCEPTIONS DU TRANSPORT AÉRIEN ?

par David Fraboulet

### 12 PROFITER DE LA CRISE DU TRANSPORT POUR RÉFORMER LE CONTRÔLE AÉRIEN EUROPÉEN LE PLUS GRAND TOURNANT DE L'HISTOIRE D'EUROCONTROL DEPUIS SA CRÉATION IL Y A 50 ANS

par Marc Baumgartner, Pierre Andribet et  
Jean-Marc Garot

### 19 CYBER MENACES VISANT LE TRANSPORT

par Raymond Rosso et Thierry Prunier

### 20 COVID-19 ET CLIMATISATION

par Jean-Bruno Kerisel et André Colpart

### 23 MAÎTRISE DE LA DATA ET RETOUR DES ÉTATS : VERS UNE ÉGALITÉ SOUVERAINE RECONNUE, AUTRE LEÇON DU DOSSIER AIRBUS

par Philippe Mueller Feuga

## ACTUALITÉS

### 28 COMPTE-RENDU DU FORUM FÉDÉRATION DU 3 OCTOBRE 2020

par Damien Hartmann

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### 30 LE PLAN DE RELANCE AÉRONAUTIQUE À L'ONERA

par Philippe Beaumier

### 37 DE L'ART DÉLICAT DE QUALIFIER L'HYDROGÈNE SUR LES AÉRONEFS DE DEMAIN

par Daniel Gaffié

### 42 L'AVION À HYDROGÈNE : AMBITION OU ILLUSION ?

par Eric Dautriat

### 47 POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR

par Luc Dini, Jean-Marc André et Joël  
Deschamps

## VIE 3AF

### 56 LA COMMISSION PROPULSION 3AF

par Michel Desaulty et Christophe  
Bonhomme

## HISTOIRE

### 59 L'OISEAU BLANC... PREMIER AÉRONEF À AVOIR TRAVERSÉ L'ATLANTIQUE D'EST EN OUEST LES 8 ET 9 MAI 1927

Par Bernard Decré

### 63 LA COOPÉRATION SPATIALE FRANCO-INDIENNE

par Mathieu Weiss, Dominique Valentian,  
Noël Marchal et Selma Cherchali

### 69 LES ORIGINES DE L'AÉRONAUTIQUE ROUMAINE SE RETROUVENT À PAU... DEPUIS L'ÉPOQUE DES PIONNIERS, D'ÉTROITES RELATIONS AVEC LA FRANCE

par Bernard Vivier

### 75 HISTOIRE DES PREMIERS VÉHICULES-FUSÉES : LES DÉMONSTRATEURS DE BUISSON ET CIURCU

par Jean-Jacques Serra

## TRÉSOR D'ARCHIVES

### 82 ROBERT ESNAULT- PELTERIE, PRÉCURSEUR DE L'ASTRONAUTIQUE

par Bruno Chanetz et Marie-Claire Coët

## NOTE DE LECTURE

### 86 INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, L'AFFAIRE DE TOUS : DE LA SCIENCE AU BUSINESS

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 Détery  
Jean-Marc Garot  
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

*Un mal qui répand la terreur,  
Mal que le Ciel en sa fureur  
Inventa pour punir les crimes de la terre,  
Faisait aux animaux la guerre.  
Ils ne mouraient pas tous, mais tous étaient frappés.*

C'est par ces lignes que débute la fable *Les animaux malades de la peste*. Saisissant parallèle avec la situation actuelle de la COVID-19. En ce pieux XVII<sup>e</sup> siècle, le roi Lion de La Fontaine impute la cause de l'épidémie aux offenses faites au Ciel. La situation est *mutatis mutandis* la même en ce XXI<sup>e</sup> siècle moins religieux, où la *vox populi* européenne a désigné les crimes commis envers la Terre, responsables de la pandémie. La suite de la fable s'attache à chercher les plus coupables :

*On n'osa trop approfondir  
Du Tigre, ni de l'Ours, ni des autres puissances,  
Les moins pardonnables offenses.  
L'Ane vint à son tour et dit : J'ai souvenance  
Qu'en un pré de Moines passant,  
Je tondis de ce pré la largeur de ma langue...  
A ces mots on cria haro sur le baudet ...  
Ce pelé, ce galeux, d'où venait tout leur mal.*

Aujourd'hui le transport de fret par la mer ou par la route ne sont pas remis en cause alors que l'aviation civile, bien que responsable de seulement 3 à 4 % de la production des gaz à effet de serre, est l'objet d'un opprobre général et condamnée à opérer une mutation spectaculaire sous l'impulsion des gouvernements européens attentifs à leur opinion publique.

Certes c'est grâce à une décision politique qu'en l'espace de dix ans les Etats-Unis ont réussi à relever le défi de parvenir à la Lune. Mais il y a loin d'un exploit à une révolution complète d'un domaine industriel avec ses exigences de sécurité et ses processus de fabrication et de certification.

L'avion à hydrogène, qui occupe le devant de la scène depuis quelques mois est ainsi débattu en trois articles complémentaires :

- Le premier décline le plan de relance aéronautique pour l'ONERA par le directeur aéronautique Philippe Beaumier.
- Le deuxième provient de la direction de l'énergétique de l'ONERA, Daniel Gaffié traitant de *l'art délicat de qualifier l'hydrogène sur les aéronefs de demain*.

- Le troisième intitulé *L'avion à hydrogène : ambition ou illusion ?* émane d'Eric Dautriat, ancien directeur des lanceurs au CNES et ancien directeur exécutif du programme européen CLEANSKY.

La crise du secteur industriel aéronautique est la conséquence de la crise du transport aérien. Aussi cette Lettre débute-t-elle par une interview de Luc Tytgat, directeur de la stratégie et de la sécurité à l'agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne (EASA). Dirigée par Patrick Ky, l'EASA est très active dans la définition et la mise place de mesures de sécurité sanitaire pour aider au redémarrage du transport aérien en Europe en coordination avec l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). Luc Tytgat conclut ainsi son interview : *L'aviation est durement mise à l'épreuve et va devoir se réinventer. Cela passera par le biais de l'innovation et de la décarbonation. Mais quand est-il du transport aérien ? le futur est-il le retour au normal et quand ? ou le transport aérien devrait-il lui aussi, se réinventer avec ses futurs passagers, qui ne seront peut-être plus tout à fait les mêmes qu'avant la crise ?*

Cette interview est suivie de nombreux points de vue sur la crise actuelle :

- David Fraboulet, directeur scientifique au ministère de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, évoque l'aide que les nouvelles technologies digitales seraient en mesure d'apporter pour l'émergence de nouveaux concepts dans le domaine du transport aérien ;
- Marc Baumgartner, contrôleur de la circulation aérienne et chef de salle au Centre de contrôle aérien en-route de Genève, Jean-Marc Garot et Pierre Andribet, tous les deux anciens directeurs du centre expérimental Eurocontrol proposent de profiter de la crise pour réformer le contrôle du trafic aérien en Europe ;
- Raymond Rosso et Thierry Prunier traitent des conséquences de la crise sur la Cyber-sécurité du transport aérien ;
- Jean-Bruno Kérisel et André Colpart évoquent la climatisation sous l'angle de la COVID-19 avec un focus de Jean-Baptiste Rigaudas sur celle des avions.

N'oubliant pas, malgré la crise mondiale du secteur aéronautique, la guerre économique qui sévit entre l'Europe et les États-Unis, Philippe Mueller-Feuga, donne une suite à son article <sup>1</sup> paru en début d'année examinant

## ÉDITORIAL (SUITE)

une autre leçon du dossier Airbus : la maîtrise de la data et le retour des états vers une égalité souveraine.

Luc Dini, évoque les derniers travaux de la commission technique SIGMA2, phénomènes aéronautiques non identifiés, qu'il préside. Dans la rubrique Histoire, Bernard Decré raconte l'épopée de l'Oiseau blanc à travers l'enquête serrée qu'il a menée. Notre Lettre n°41, parue au début de l'année, avait déjà mis en exergue deux enquêtes scientifiques remarquables conduites sur les vols MH370 par Jean-Marc Garot et AF66 par Hubert Cantalloube.

<sup>1</sup> extraterritorialité du droit américain et souveraineté : le dossier Airbus, entre intérêt national et éthique, Lettre n°41.

<sup>2</sup> inscriptions en suivant : <https://w3.onera.fr/alumni/content/myst%C3%A8res-et-%C3%A9nigmes-de-la%C3%A9ronautique>

## LE MESSAGE DU PRÉSIDENT

Chers Amis,

La situation à laquelle s'affronte la 3AF, comme toutes les sociétés du secteur aérospatial, nous impose de limiter nos dépenses. C'est ainsi que nous avons réduit notre occupation de locaux rue Galilée. Nous avons remis à disposition de l'Aéroclub de France, propriétaire des lieux, les bureaux donnant sur cour et conservé uniquement ceux donnant sur rue, ainsi que la salle de réunion. Nos archives, jusque-là hébergées dans le XVe arrondissement de Paris ont été triées et réduites. Avec les nouveaux documents en provenance des locaux abandonnés rue Galilée, elles ont été transférées dans un garde-meuble de l'Essonne, moins onéreux.

Nous adaptant au contexte sanitaire, à l'instar de nombreuses autres associations et structures, nous avons pris l'initiative d'organiser notre prochaine Assemblée Générale de façon virtuelle. Elle se tiendra le 16 décembre 2020 à partir de 16h, et outre le fait que ce mode de fonctionnement nous permettra d'expérimenter – par la force des choses – le vote électronique de nos membres, nous espérons qu'il nous permettra de nous réunir plus nombreux en nous affranchissant des distances. Nous avons estimé plus raisonnable de reporter à mai 2021 nos conférences Space Propulsion 2020 et IES2020 (Intelligence Economique et Stratégique) respectivement en février et mai 2021. Cependant les autres activités de 3AF se poursuivent. Les commissions techniques se

Les auteurs de ces quatre articles se retrouveront le 16 novembre 2020 à l'hôtel de l'industrie à l'occasion du colloque Mystères et énigmes de l'aéronautique <sup>2</sup>.

Le volet Histoire de cette Lettre se poursuit avec la coopération avec l'Inde au niveau des lanceurs et les origines de l'aviation roumaine. La Lettre s'achève par un article sur les premiers véhicules fusées, suivi d'une évocation des travaux de l'inventeur Esnault-Pelterie sur les moteurs-fusées, résultat de l'exploitation des archives 3AF retrouvées aux Mureaux chez Ariane Group, où elles étaient hébergées. ■

Bruno Chanetz  
rédacteur en chef, président du Haut conseil scientifique



réunissent, le Haut conseil scientifique a tenu une réunion le 24 juin dernier : un nouveau groupe de travail a été lancé sur l'Aérostation et les dirigeables, un autre a été réactivé sur la maintenance prédictive. Le 18 septembre, un colloque en l'honneur de l'industriel Henry Potez s'est tenu à Méaulte dans les Hauts-de-France. Ce colloque, organisé par Eric Deletombe, président du Groupe régional Hauts-de-France et Bruno Chanetz, président du Haut conseil scientifique, a réuni une cinquantaine de participants. Le compte-rendu vous sera donné dans la prochaine Lettre 3AF.

Un important chantier de modernisation de notre association concerne le digital. Nous avons lancé début octobre la refonte complète de notre site internet et de la base de gestion des membres et espérons qu'il sera accessible dès la fin de cette année.

Enfin, j'ai le plaisir de vous annoncer la nomination, depuis le 8 Octobre 2020, d'un nouveau Secrétaire général en la personne de Jean François Coutris, jusqu'alors Secrétaire général adjoint.

Mais tout de suite je vous laisse découvrir la présente Lettre qui s'intéresse à la crise du transport aérien et au plan de relance de la filière aéronautique. ■

Louis Le Portz  
président de la 3AF

## INTERVIEW

# LUC TYTGAT, DIRECTEUR DE LA STRATÉGIE À L'AGENCE DE L'UNION EUROPÉENNE POUR LA SÉCURITÉ AÉRIENNE (AESA – EASA European Union Aviation Safety Agency)

Par Jean-Pierre Sanfourche, membre de comité de rédaction de la Lettre 3AF



Luc Tytgat, directeur de la stratégie à l'Agence de l'union européenne pour la sécurité aérienne (AESA / EASA).

**Jean-Pierre Sanfourche :** En ces temps extrêmement difficiles pour l'aviation mondiale en raison de la crise due à la pandémie COVID-19, je souhaiterais faire le point avec vous sur l'ensemble des dispositions que vous prenez en Europe pour y faire face le mieux possible. Peut-être afin d'introduire notre conversation pourriez-vous exposer la philosophie générale d'action de l'EASA ?

**Luc Tytgat :** Pour résumer notre philosophie générale, je dirais que l'Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne agit dans l'intérêt des citoyens européens et au

service de l'industrie aéronautique européenne, pour une aviation toujours plus sûre et toujours plus verte. Notre industrie a été durement frappée par la pandémie de COVID-19 et nous redoublons d'efforts pour :

- accompagner notre industrie sur le long et difficile chemin de sortie de crise ;
- regagner la confiance des passagers dans le transport aérien en mettant en place les mesures nécessaires pour que leur sécurité sanitaire soit maximale lors de toutes les phases de leur voyage ;
- assurer la pérennité de l'EASA.

**JPS :** L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a mis en place le groupe de travail CART (Council Aviation Recovery Task Force) chargé de formuler des recommandations et directives générales visant à répondre à la crise COVID-19 en proposant des mesures les plus pertinentes pour en optimiser sa gestion puis pour préparer la reprise de l'aviation civile.

Comment l'EASA participe-t-elle à ces travaux ? Quels sont les points forts de vos propositions et recommandations ?

**LT :** L'EASA a été invitée, avec la Commission européenne, à participer aux travaux de ce groupe de travail de l'OACI dès sa mise en place en mai 2020. À ce moment-là, l'élaboration par l'EASA et le centre européen de prévention et de contrôle des maladies (ECDC) d'un protocole de sécurité sanitaire pour le transport aérien en Europe était déjà très avancée. Les mesures proposées dans le protocole ont ainsi pu être introduites dans les discussions à l'OACI dès le début. Ce protocole de sécurité sanitaire est même aujourd'hui reconnu par l'OACI comme l'outil de mise en œuvre de ses recommandations dans les 56 états de la région Europe de l'organisation.

L'une des forces de notre approche est que nous avons signé avec les principaux acteurs, aéroports et compagnies aériennes, une charte de suivi de la mise en œuvre de notre protocole. Cette charte nous permet de recueillir des données qui nous permettent d'adapter si

## INTERVIEW

### LUC TYTGAT, DIRECTEUR DE LA STRATÉGIE À L'AGENCE DE L'UNION EUROPÉENNE POUR LA SÉCURITÉ AÉRIENNE

nécessaire nos recommandations au fur et à mesure de l'évolution de la situation sanitaire. Nous constatons aujourd'hui que les risques pour les voyageurs aériens d'attraper la COVID-19 dans un avion sont marginaux si les mesures sanitaires sont appliquées telles que nous les avons préconisées. Seuls sept passagers sur trois millions de passagers au cours des dernières semaines ont présenté des symptômes du virus à bord. Les risques sont sous contrôle grâce au travail des compagnies aériennes et des aéroports.

**JPS :** Pourrions-nous passer en revue les relations que vous entretenez avec les autres grandes organisations :

- l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ;
- la Commission européenne ;
- l'Association du transport aérien international (IATA *International Air Transport Association*) ;
- le Conseil international des aéroports (ACI Europe) ;
- l'Association de l'aviation européenne (EAA *European Aviation Association*) ;
- l'Association européenne des hélicoptères (EHA *European Helicopter Association*) ;
- les Autorités nationales de l'aviation (NAA *National Aviation Authorities*) ;
- l'industrie aéronautique européenne.

**LT :** Plutôt que de rentrer dans le détail de nos relations avec chacune de ces organisations, je distinguerais nos partenaires institutionnels (Commission européenne et états membres représentés par les autorités nationales d'aviation civile) d'une part et nos partenaires industriels (associations de compagnies aériennes, d'aéroports, de constructeurs, etc.) d'autre part. Dans les deux cas, nous coopérons de manière soutenue pour atteindre l'objectif que j'ai énoncé en introduction.

À titre d'exemple, nous avons signé des accords de coopération très importants avec l'association internationale du transport aérien (IATA) et la branche européenne du conseil international des aéroports (ACI Europe) pour la mise en œuvre du protocole de sécurité sanitaire EASA/ECDC. Par cet accord, les deux associations s'engagent à coordonner la mise en œuvre du protocole sanitaire auprès de la communauté aéroportuaire européenne et des compagnies aériennes. Ceci est indispensable pour faciliter l'harmonisation des mesures en Europe.

Un réseau croissant d'opérateurs aéroportuaires et de compagnies aériennes mettent en place des mesures pour

offrir des voyages harmonisés et sûrs dans toute l'Europe et au-delà. Près de 150 aéroports et 50 compagnies aériennes ont signé avec nous une charte où elles s'engagent à mettre en œuvre notre protocole sanitaire et à collaborer avec leurs autorités nationales pour prendre les mesures nécessaires en faveur de la sécurité sanitaire, et à faire bénéficier l'ensemble des parties prenantes de leurs retours d'expériences pour améliorer la protection des passagers.

**JPS :** Vous venez de publier (28 août) une directive permettant d'organiser l'enseignement virtuel à distance pour transmettre la partie théorique de la formation et l'entraînement dans les domaines suivants : membres d'équipage, procédures de certification, opérations aériennes, contrôle aérien. Comment cette directive est-elle reçue et comment se met-elle en application ?

**LT :** L'agence a publié un guide visant à faciliter la mise en place de classes virtuelles ainsi que l'enseignement à distance durant la crise de la COVID-19.

<https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/news/easa-publishes-guidance-allowing-virtual-classroom-instruction-and>

La mise en place est relativement simple car l'enseignement à distance est déjà défini dans la réglementation et la mise en place de classes virtuelles est présentée comme une alternative à l'enseignement classique qui répond aux impératifs de distanciation sociale. Cependant, il était important de guider les organismes ainsi que les autorités sur les critères à respecter pour conserver un enseignement de qualité. Ce guide répond aux attentes de l'industrie et des autorités qui doivent assurer la continuité de l'enseignement d'autant plus que de nombreux cours doivent être effectués en temps limité.

**JPS :** Comment la crise de la COVID-19 va-t-elle être prise en considération dans la prochaine édition du Plan Européen pour la Sécurité de l'Aviation (EPAS *European Plan for Aviation Safety*) ?

**LT :** Tout d'abord nous n'avons pas attendu la publication d'une nouvelle édition de l'EPAS pour agir. L'Agence a redéployé des ressources pour lancer immédiatement, avec l'industrie et les États membres, des actions dans le cadre du projet dit RNO pour « *Return to Normal Operations* ». Ces actions à court terme ne

## LUC TYTGAT, DIRECTEUR DE LA STRATÉGIE À L'AGENCE DE L'UNION EUROPÉENNE POUR LA SÉCURITÉ AÉRIENNE



*Bâtiment de l'Agence européenne de la sécurité aérienne à Cologne (Allemagne)*

sont généralement pas éligibles pour l'EPAS qui est un plan à 5 ans. Ce projet RNO nous a permis d'identifier les principaux risques que nous considérons comme cruciaux pour la reprise de l'activité du transport aérien. Les enseignements tirés de ce processus seront intégrés à l'EPAS à mesure que nous nous adapterons à la nouvelle normalité. Par ailleurs nous avons publié de nombreuses recommandations et instructions sur notre site internet car dans cette période, il est primordial que la sécurité aérienne ne soit pas compromise.

**JPS : Pourriez-vous présenter les scénarios que l'AESA prévoit pour faciliter et accompagner le processus de sortie de crise et de retour des opérateurs aériens aux conditions normales ?**

LT : Notre projet RNO comporte plusieurs volets afin d'agir au plus près des préoccupations des acteurs du secteur et de traiter les problèmes spécifiques aux compagnies aériennes, ceux relatifs aux constructeurs et organismes de production et ceux des autorités nationales d'aviation civile. Enfin nous travaillons avec les autorités sanitaires pour assurer comme indiqué ci-dessus la sécurité sanitaire des passagers et personnels de l'aérien pendant toutes les phases du voyage en avion.

Par ailleurs nous avons choisi de faciliter l'octroi de dérogations à l'industrie pour lui permettre de satisfaire aux exigences réglementaires. Nous avons aussi adapté notre processus planification pour laisser plus de temps à l'industrie pour s'adapter.

En dépit de la crise qui frappe notre secteur nous voulons renforcer notre engagement à rendre l'aviation plus verte et plus durable à long terme. C'est un enjeu de survie pour notre industrie et nous avons développé à cette fin un plan stratégique à 4 ans pour une aviation plus verte. À titre d'exemple, nous travaillons avec la Norvège sur un projet d'électrification de l'aviation, nous soutenons les efforts de l'industrie en faveur de l'hydrogène et sommes sur le point d'émettre une proposition réglementaire visant à améliorer l'efficacité de la consommation de carburant des avions de transport aérien commercial. Vous verrez que ce domaine a été largement renforcé dans la prochaine édition de l'EPAS.

Enfin nous croyons également plus que jamais à l'investissement dans la recherche et l'innovation pour une sortie de crise plus efficace grâce à l'incorporation de nouvelles technologies et de nouveaux concepts.

**JPS : Pour conclure, quelques mots sur vos priorités absolues à l'heure actuelle, et peut-être aussi sur votre vision sur les conséquences de la crise de la COVID-19 à court et moyen terme sur l'aviation et plus spécialement sur l'aviation européenne ?**

LT : L'aviation est durement mise à l'épreuve et va devoir se réinventer. Cela passera par le biais de l'innovation et de la décarbonisation.

**JPS : Au nom de l'Association aéronautique et astronautique de France, je vous adresse mes plus vifs remerciements pour cet entretien.** ■

# Aéronautique post COVID-19 : les nouvelles technologies digitales seraient elles-en mesure d'aider à l'émergence de nouvelles conceptions du transport aérien ?

par David Fraboulet, Ministère de l'Enseignement supérieur de la Recherche et de l'Innovation



*David Fraboulet est Directeur Scientifique, Chef de Secteur A3 Maths Physique Nanosciences, sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC) au Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Innovation. Direction Générale de la Recherche et de l'Innovation, Service de la Stratégie de la Recherche et de l'Innovation. Cet article reprend les idées qu'il avait développées lors de la réunion du Haut conseil scientifique de la 3AF qui s'est déroulée le 24 juin 2020 rue Galilée.*

## CRISE ET ENJEUX À COURT ET LONG TERME

L'aéronautique est sans conteste l'un des gros points forts industriels de la France et de L'Europe. Dans le contexte de 2020 la crise sanitaire associée à la COVID-19, ainsi que ses conséquences directes économiques et sociétales, ce secteur fait partie de ceux qui sont le plus durement touchés, avec une réduction drastique de la demande qui déstabilise tous les équilibres économiques et logistiques, rendant difficile de répondre à la demande, même lorsqu'elle existe. C'est donc un cercle vicieux qu'il s'agit d'enrayer. Le gouvernement français a parfaitement pris la mesure de cette situation et a annoncé des plans très ambitieux de redressement du secteur.

Assorti à cela, on peut compter sur les ressorts profonds d'une communauté de recherche et d'industrie de très haut niveau scientifique et technologique, plutôt bien soudée, et chez qui l'esprit d'innovation et de conquête reste profondément ancré. Les succès technologiques passés et présents des grands noms de cette industrie témoignent largement de ce dynamisme.

Cet optimisme (qui est un instinct signe de santé selon Saint-John Perse) doit s'accompagner de remises en cause profondes de la réalité des marchés futurs, et de l'identification de multiples voies nouvelles qui pourraient ré-enchanter le secteur aérien.

Bien avisé celui qui saurait prédire comment et à quelle vitesse la situation globale de mi 2020 va pouvoir évoluer. Dans le meilleur des cas, la crise - disons virale - ne revient que modérément et disparaît progressive-

ment des radars dans les 6 mois à venir. Dans le meilleur des cas aussi, les impacts économiques et sociétaux de cette crise virale sont relativement vite surmontés, disons à l'échelle d'un an. Dans ce cas le plus optimiste, l'enjeu face à nous sera une remontée en puissance la plus efficace possible afin de maintenir et renforcer la position européenne dans le secteur.

Dans les hypothèses les plus pessimistes, la crise sanitaire tarderait à se faire oublier, et les impacts psychosociaux seraient bien plus élevés. Le challenge n'en serait que plus grand pour un secteur qui devra alors refaire la preuve de ses atouts, le tout dans un contexte de conscience accrue de l'importance de la protection de l'environnement, avec des réactions sociales et donc aussi politiques pas toujours basées sur des arguments fondés, d'ailleurs. Le secteur aérien, du fait pour l'heure d'un plus difficile report vers les énergies décarbonées, du fait aussi d'une consommation énergétique apparente (au km.passager) élevée, est - faut-il l'avouer - un peu dans le collimateur.

Dans tous les cas, le secteur aérien est donc réinterrogé, sur des échelles de temps difficiles à prévoir, avec de multiples enjeux. On ne peut évidemment pas écarter que les affaires reprennent presque sans aucune différence par rapport à la situation avant la COVID-19, et c'est même peut-être encore l'hypothèse la plus probable. Parier 100% des stratégies à venir sur de telles hypothèses nous semble pour autant hasardeux.

## AÉRONAUTIQUE POST COVID-19 : LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DIGITALES SERAIENT ELLES-EN MESURE D'AIDER À L'ÉMERGENCE DE NOUVELLES CONCEPTIONS DU TRANSPORT AÉRIEN ?

À court terme, les enjeux à considérer nous semblent être notamment les suivants :

- protection sanitaire des voyageurs dans l'aéronef;
- protection sanitaire des voyageurs dans les terminaux;
- justification « éco-climatique » accrue de l'aérien par rapport aux autres modes de transport, surtout pour le court courrier;
- réadaptation par rapport à une possible évolution des demandes du marché.

Ces enjeux assez directement apportent des questions plus techniques tant sur les aéronefs que sur l'organisation du système aérien :

- réaménagement des intérieurs cabine, réflexions sur la mise en place de barrières physique;
- individualisation accrue des cellules d'atmosphère privée pour chaque passager;
- optimisation des flux des passagers et de leur contrôle à l'embarquement et au débarquement;
- minimisation des escales en long courrier;
- restructuration des gros hubs.

À plus long terme, on peut penser à une réadaptation vers des aéronefs différents compte tenu de nouvelles aspirations client et d'une nouvelle complémentarité à trouver ou retrouver face au transport terrestre. Certains commencent à préconiser que l'avion devrait progressivement se voir interdit (!!!) sur toutes les dessertes court courrier en concurrence avec le transport terrestre, notamment le rail. Cette interrogation interventionniste peut s'avérer légitime du point de vue environnemental, en particulier sur les dessertes à forte fréquentation et pour lesquelles les infrastructures terrestres sont déjà en place. Pour les lignes moins fortement fréquentées, de surcroît sur lesquelles l'infrastructure (ferroviaire ou routière) n'est pas vraiment là, c'est une vraie analyse systémique qu'il faudra engager. Les infrastructures terrestres sont très onéreuses, tant économiquement que environnementalement, peu flexibles, et dans bien des cas, peu crédibles, ce qui peut laisser la place à une aéronautique nouvelle et adaptée. Au-delà de cela, les efforts effectués vers une aéronautique décarbonée, et/ou électrique, s'ils semblent encore très ambitieux et de sortie encore lointaine, redéfiniront radicalement ces analyses systémiques comparées.

### RÉINVENTER LE GÉNIE DE LA FLEXIBILITÉ AÉRIENNE ?

Il nous semble donc qu'il faut avant tout réinventer le génie de la flexibilité aérienne en allant vers le transport « point à point », possiblement électrique ou décarboné. Quid par exemple d'avions régionaux court courrier avec des spécifications plus étroites et plus précisément adaptées au service ? Pour les transversales ? avec une grande optimisation de la desserte de proximité ? avec une simplification extrême des procédures d'embarquement ? Quid de l'émergence de petits hubs ? Quid de la modification de l'utilisation de hubs secondaires ?

Il y a un an, ces thématiques, certes déjà identifiées, représentaient surtout des marchés potentiellement émergents et complémentaires au gros du marché aérien. Compte tenu du nouveau contexte, elles pourraient – nous semble t'il – dans un scénario relativement pessimiste de l'évolution de la crise devenir de vrais relais de croissance.

Nous nous focaliserons ici plutôt sur l'apport des technologies et en particulier de celles du numérique sur ce potentiel relais de croissance de flottes nouvelles vers la réduction des tailles et performances des aéronefs. On renverra ailleurs d'autres réflexions pas incompatibles, comme par exemple, pour la réduction des escales l'émergence d'avions très longue distance. Pour la réduction des renvois vers les gros hubs, le regroupement en vol en escadrilles d'avions de taille intermédiaire pourrait aussi être conceptualisé, par exemple par synchronisation d'escadrilles océaniques d'appareils monocouloir. La réflexion est déjà menée en vue de la gestion du trafic aérien ; elle doit aussi être menée en vue de systèmes de synchronisation et d'asservissement dynamiques. Ce qui est vrai et justifiable en transocéanique pourrait l'être aussi sur des distances plus courtes et pour des aéronefs plus petits.

Les considérations décrites ci-dessus ouvrent indirectement à de multiples opportunités d'innovation applicative comme par exemple, à court terme, les techniques de filtration d'air renforcées et ou de compartimentation accrue des cabines ou encore le développement de transport « intermodal » plus optimisé, par exemple entre le rail, l'aérien et la route. L'un des enjeux majeurs néanmoins est de conserver voire d'accroître la compétitivité économique des solutions proposées, ce

## POINT DE VUE

### AÉRONAUTIQUE POST COVID-19 :

## LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DIGITALES SERAIENT ELLES-EN MESURE D'AIDER À L'ÉMERGENCE DE NOUVELLES CONCEPTIONS DU TRANSPORT AÉRIEN ?

qui passera très certainement par des innovations fortes dans tous les pans du secteur depuis la conception, la fabrication industrielle, la gestion et la maintenance tant des aéronefs que des infrastructures. Les technologies du numérique et leurs multiples déclinaisons, comptent parmi les solutions technologiques pressenties pour parvenir à cela.

A moyen et long termes d'autres questions s'ouvrent, et ce de manière différenciée pour le court ou très court courrier et pour le long ou très long courrier.

Pour le long courrier, la réduction des escales pourrait apporter des exigences accrues de vitesse et de portée, ce qui pourrait ouvrir des recherches vers l'hypervélocité en vol commercial, et donc le vol suborbital. Nous ne développerons pas cet aspect ici.

Pour le court courrier, les évolutions encore un peu prospectives vers l'hybridation électrique de la propulsion pourraient bien devenir très attendues. Cela impliquera de nouveaux paradigmes et possiblement de nouveaux concepts (comme la propulsion répartie) vers lesquels l'automatisation accrue sera de plus en plus nécessaire. On voit mal en effet un pilote gérer lui-même l'équilibre de propulsion d'un grand nombre de moteurs, surtout pour reconstituer des effets de manœuvre remplaçant progressivement l'usage des surfaces de contrôle. Il faudra alors, plus encore que dans les configurations d'aujourd'hui, reconstituer au pilote des sensations qu'il puisse utiliser intuitivement et des modes de contrôle en quelque sorte virtualisés.

Tout particulièrement si la taille des aéronefs devait revenir à la baisse pour permettre une optimisation accrue des flux voyageurs en court et très court courrier, on voit difficilement comment la certification mono-pilote pourrait être évitée, ce qui impliquera pratiquement un pilotage complètement autonome, dans des trafics à terme significativement densifiés.

### LES NOUVELLES TECHNOLOGIES ET L'IA AU SERVICE DE LA TRANSFORMATION DU SECTEUR AÉRIEN

Un nombre significatif de stratégies nationales (et européennes) de recherche développement et d'accélération industrielles sont en cours ou en préparation sur un certain nombre de briques de base nécessaires dans

tous les pans de nos activités et de notre industrie, et qui nous semblent particulièrement pertinentes pour apporter des technologies capacitantes au service de tous ces nouveaux objectifs de l'aéronautique.

Les efforts de développement portent d'abord sur de nouvelles capacités de calcul haute performance, avec des développements pour maintenir et si possible renforcer notre souveraineté en ce domaine. Sans aller jusqu'au calcul quantique, également préparé, mais d'horizon plus lointain, tous ces moyens de calcul seront à la disposition des bureaux d'étude afin d'aller plus vite pour la définition de conceptions nouvelles, plus rapidement optimisées, avec des boucles simulation-expérience toujours plus rapides et plus précises. Ces moyens de calcul centraux ou semi centraux permettront aussi à l'ingénierie de s'appuyer sur des développements en réalité virtuelle ou mixte de plus en plus fluides, avec l'appui de technologies haptiques, permettant de raccourcir la conception optimale des aéronefs, mais aussi la préparation de l'environnement de leur fabrication en usine, ou encore de leur maintenance en opération.

A une autre échelle, la croissance des moyens de calcul, grâce aux progrès combinés de l'algorithmie, du software et aussi très largement du hardware, est également clé dans les systèmes embarqués. Au niveau de l'aéronef, cela permet des fonctions toujours plus performantes, des automatisations progressivement plus poussées. L'une des grandes révolutions attendues prochainement est l'intégration de systèmes d'intelligence artificielle (IA) embarqués, pour une aide au pilotage toujours plus souple, flexible, adaptative, et par le biais de l'apprentissage continu embarqué toujours plus fiable. Cependant de multiples défis restent encore devant nous pour ce type d'intégration au niveau aéronef :

- Progrès sur l'explicabilité et la reproductibilité des systèmes IA à apprentissage, pour leur certification, et cybersécurité associée.
- Interaction de ces systèmes dans les processus de décision et dans les contrôles effectués par le pilote.
- Réduction drastique des consommations énergétiques et plus largement des ressources embarquées.

Ce dernier point est un grand défi et implique des évolutions très significatives des technologies sous-jacentes, pour l'heure encore très gourmandes en calcul, ce qui fait que l'apprentissage reste majoritairement effectué en avance de phase et au sol. L'usage des IA

## AÉRONAUTIQUE POST COVID-19 : LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DIGITALES SERAIENT ELLES-EN MESURE D'AIDER À L'ÉMERGENCE DE NOUVELLES CONCEPTIONS DU TRANSPORT AÉRIEN ?

embarquées est performante et temps réel, principalement en mode réaction, mais reste difficilement temps réel en mode apprentissage embarqué.

Les circuits sur lesquels ces algorithmes tournent sont pour l'heure le plus souvent des circuits à processeurs CMOS conventionnels encore peu spécifiques donc gourmands en ressource. La trajectoire d'évolution en cours va passer progressivement par des circuits de technologie encore conventionnelle, mais plus spécifiquement conçus pour les calculs neuronaux, tant en utilisation qu'en apprentissage. C'est le cœur de la bataille industrielle en cours au niveau des concepteurs de circuit silicium.

L'étape d'après, en préparation - plus en amont de la recherche technologique, logiciel et algorithmie - va exploiter des composants élémentaires spécifiques adaptés, des décades moins gourmands en énergie (memristors, nanoswitchs, etc.). Des organisations logiques différentes, plus proches du fonctionnement du cerveau biologique et basées non plus sur une succession d'états logiques stationnaire et sur le rythme d'une fréquence d'horloge comme toutes les technologies numériques d'aujourd'hui mais sur des logiques de flux d'information continu temps réel (Spiking neural network).

Ces technologies, pour une application en embarqué, devront-elles aussi - faire la preuve de leur robustesse et de leur sécurité. Une bonne part de leur efficacité reposera probablement sur une hybridation avec des logiques et des composants conventionnels pour le contrôle a posteriori, avec des délégations et des priorités de préséance dans la validité des décisions rapides qui ne seront pas simples à arbitrer entre calcul de décision complexe par IA et le contrôle d'enveloppe de décision par des moyens plus conventionnels.

Un autre point très essentiel de l'efficacité de ces « IA » réside dans la profusion et la qualité des données qui leur seront fournies à l'aide de multiples capteurs. Ainsi dans le cas d'un contrôle d'attitude d'aéronef, on pourra fusionner des données issues de capteurs tels que pression, vitesse, température, des capteurs inertiels (accéléromètres, gyromètres, etc.), des capteurs imageurs dans plusieurs bandes spectrales (visible, infrarouge, etc.), des capteurs d'effort mécanique, des récepteurs de géolocalisation, et tout autre type de technologie de

capture, existant ou en cours de développement. En soi le développement des technologies de capteur, ainsi que les moyens de les connecter, par exemple par voie radio fréquence, est un vaste champ de développement (on parle d'internet des objets aussi pour la mise en œuvre d'un tel système).

Pour coupler efficacement l'ensemble de ces données à un calculateur embarqué central, il est cependant souhaitable d'adjoindre autant que possible à chaque capteur une intelligence locale éventuellement dotée aussi de capacités d'apprentissage, qui soit en mesure de trier l'information signifiante avant envoi vers le nœud embarqué central au niveau de l'aéronef. Là aussi, et peut être plus encore, le besoin de rapidité temps réel, et de frugalité de ressource, notamment énergétique, est essentiel, renvoyant encore aux besoins de R&D sur des technologies innovantes.

Pour la partie embarquée, et dans l'hypothèse la plus probable d'un aéronef non strictement autonome et encore piloté, les multiples moyens d'interaction entre l'intelligence embarquée et le pilote doivent être construits de manière ergonomique permettant au pilote de maîtriser sa trajectoire de manière la plus simple et intuitive possible, là aussi avec une gestion des délégations et des priorités de décision pas toujours simple à déterminer d'avance. Diverses technologies d'Interaction Homme Machine (IHM) sont encore au stade de R&D et mériteront de suivre la trajectoire habituelle de développement et de validation.

L'ensemble de ces architectures numériques internes à l'aéronef, sont un excellent exemple de l'articulation des besoins de développement, maturation, sécurisation, certification et industrialisation des moyens numériques. Ce n'est pourtant qu'une partie de l'édifice car de plus en plus cet aéronef est intégré dans un environnement et un système plus global avec des besoins de connectivité, de capture d'information, d'optimisation système que ce soit en bord-bord ou bord-sol.

### EN CONCLUSION

Si nous revenons maintenant à l'hypothèse d'un développement d'aéronefs plus petits pour de multiples dessertes passager très court ou court courrier, possiblement à terme électrifiés, on conçoit que l'une des clés sera évidemment le coût. Coût de conception et fabrication

## POINT DE VUE

### AÉRONAUTIQUE POST COVID-19 : LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DIGITALES SERAIENT ELLES-EN MESURE D'AIDER À L'ÉMERGENCE DE NOUVELLES CONCEPTIONS DU TRANSPORT AÉRIEN ?

des aéronefs et des systèmes de contrôle, coût et fiabilité aussi de l'opération et des maintenances.

Pour caricaturer, on pourrait dire qu'après des décennies de course à l'économie et à la sécurité, course largement gagnante d'ailleurs, par croissance progressive des appareils commerciaux vers les standards actuels, l'un des nouveaux défis de l'industrie aéronautique pourrait être de savoir réappliquer de nouveau toutes ces performances vers des appareils plus petits, en retendant progressivement vers des aéronefs de la taille d'appareils d'aviation générale ou d'aviation d'affaire, du reste tout de même plutôt plus faciles à concevoir électriques.

Pour que la transformation ait une chance d'aboutir, il faudra viser des appareils de performance contenue et de coûts contenus mais de facilité d'usage accrue,

de fiabilité très élevée, intégrés dans un système de contrôle de vol de même exigence. C'est en tout cas une perspective exaltante du point de vue technique, et qui pourrait, au travers de nouveaux modèles économiques au niveau des opérateurs de vol et du service voyageur, plus centrés sur les besoins et aspirations de transport de chaque voyageur, permettre l'émergence de tout un nouveau secteur économique.

*Remerciements : ces réflexions s'enracinent dans de multiples contacts notamment dans le cadre des manifestations de l'Académie de l'air et de l'espace, mais aussi plus largement dans un travail de prospective commun au CEA et à l'ONERA sur l'avion électrique, piloté par l'auteur et Antoine Guigon. L'ensemble des experts impliqués est vivement remercié (voir Lettre 3AF n° 32 – la prospective à l'ONERA, article de Jean Hermetz).* ■

## Profiter de la crise du transport pour réformer le contrôle aérien européen Le plus grand tournant de l'histoire d'Eurocontrol depuis sa création il y a 50 ans

par Marc Baumgartner, Pierre Andribet et Jean-Marc Garot, membre 3AF

*Marc Baumgartner est contrôleur de la circulation aérienne et chef de salle au Centre de contrôle aérien en route de Genève. Il fut également président de la Fédération internationale des associations de contrôleurs aériens (IFATCA). Pierre Andribet a quitté ses fonctions de directeur du centre expérimental Eurocontrol en 2020. Jean-Marc Garot est également ancien directeur du centre expérimental Eurocontrol et ancien secrétaire général de la 3AF.*

**Le président de la 3AF rappelle que les membres s'expriment librement dans la revue mais que leur opinion n'engage qu'eux-même. Concernant le contrôle aérien, ce n'est qu'un des paramètres du transport aérien. Il ne faut cependant pas oublier la place du militaire qui relève de la souveraineté nationale.**

*Le contrôle du trafic aérien européen est frappé par la crise du transport aérien. Comme dans d'autres domaines, la crise est révélatrice de défauts latents. Le discours dominant est d'espérer le retour le plus rapidement possible à la situation (jugée par certains, trop) confortable que ce domaine a connue.*

*Au contraire, cet article plaide pour qu'enfin le contrôle du trafic aérien européen accepte de se réformer sur le plan financier mais surtout institutionnel avec un ambitieux projet européen.*

## POINT DE VUE PROFITER DE LA CRISE DU TRANSPORT POUR RÉFORMER LE CONTRÔLE AÉRIEN EUROPÉEN

### AVANT PROPOS

Les perspectives de retour du trafic aérien à un niveau pré COVID-19 s'éloignent de jour en jour. Parmi les conséquences de la crise du transport aérien, il en est une moins connue : le contrôle du trafic aérien en Europe s'est fracassé contre le « mur du financement ».

Périodiquement revient l'antienne du « mur de la capacité » ; une soi-disant saturation de l'espace aérien qui serait la cause de retards des avions. En réalité, elle n'est due qu'à l'inefficacité du contrôle du trafic aérien en Europe, notamment, du fait de la fragmentation de la gestion de l'espace aérien en espaces nationaux avec des moyens techniques obsolètes.

Les tentatives de la Commission européenne avec les étapes du Ciel unique européen (Single European Sky ou SES, [https://ec.europa.eu/transport/modes/air/ses\\_en](https://ec.europa.eu/transport/modes/air/ses_en)) n'ont pas tenu leurs promesses sur tous les plans : institutionnel, opérationnel et technique, comme le montrent, même de façon édulcorée, de nombreux rapports comme :

- Report from the commission to the European Parliament and the Council on the implementation and progress of the Single European Sky during the 2012-2014 period: [https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/single\\_european\\_sky/doc/reports/com%282015%29663.pdf](https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/single_european_sky/doc/reports/com%282015%29663.pdf)
- Baumgartner, M. and M. Finger (2014). The Single European Sky gridlock: a difficult 10-year reform process. *Utilities Policy*, 31, 289–301. <https://ideas.repec.org/a/eee/juipol/v31y2014/icp289-301.html>
- Le rapport de la cour des comptes Européennes n° 11/2019 : « La réglementation adoptée par l'UE pour moderniser la gestion du trafic aérien apporte une valeur ajoutée, mais les financements étaient en grande partie inutiles ». <https://www.eca.europa.eu/fr/Pages/DocItem.aspx?did=%7BB92E9AA1-0FE7-4CE6-8ED4-Bo4A4EoF42DD%7D>

Dans les textes européens, le contrôle du trafic aérien est reconnu comme un service public qui faisait déjà, parfois, l'objet de délégations du service public. Conforme à sa doctrine libérale, l'idée force de la Commission européenne, était de pousser au transfert à des entités « privées » qui auraient été « régulées ». Mais le contrôle du trafic aérien est un monopole avec des clients captifs et il n'y a rien de pire qu'un monopole d'État... si ce n'est un monopole privé.

Les États membres ont réussi à vider le Ciel unique européen de son contenu et on ne peut savoir si son modèle « libéral » aurait pu réussir. Et pire, le processus de réforme a créé une fragmentation additionnelle (à celle de la provision des services de la navigation aérienne), cette fois institutionnelle, avec la création d'environ treize nouvelles institutions avec quatre nouvelles agences ou organisations européennes ainsi que des « blocs fonctionnels d'espaces » avec l'objectif initial de réduire la fragmentation opérationnelle, mais qui n'a finalement fait que rajouter une couche supplémentaire à l'organisation existante.

Ici, on ne s'intéressera qu'aux aspects financiers, qui, comme dans beaucoup d'autres domaines, étaient latents mais que la crise n'a fait que révéler.

Le transport aérien international est exempté de taxe sur le kérosène et de TVA sur les billets d'avion des vols internationaux, mais cette exemption ne s'applique pas aux liaisons intérieures. Pour celles-ci, les nombreuses taxes et redevances, redevances aéroportuaires (la redevance par passager, la redevance d'atterrissage, la redevance de stationnement, la redevance de balisage, la redevance carburant, censées couvrir le coût des services rendus dans l'aéroport), taxes de sûreté, de solidarité, de contrôle du trafic aérien dit « terminal » (dans un rayon de 20 km autour des aéroports) et « en route » (qui concerne aussi bien les vols au départ ou à l'arrivée en France que les survols) représentent parfois plus de 50% du prix du billet.

Avant la crise de la COVID-19, il était prévu de taxer encore plus le transport aérien pour la défense de l'environnement avec de nouvelles taxes et la fin de l'exemption de taxe sur le kérosène. En ce qui concerne ce dernier point, le résultat aurait été que les « compagnies du Golfe », par exemple, auraient rempli leurs réservoirs, au départ et, de ce fait, augmenté la consommation de carburant, préjudiciable à l'environnement.

On pourrait aussi analyser les conséquences pour les aéroports de leurs pertes de revenus du fait de la perte de trafic. Ce n'est pas par hasard que le projet de privatisation d'Aéroports de Paris est remis aux « calendes grecques ».

On se limitera ici aux redevances pour le contrôle du trafic aérien dit « en route ».

## POINT DE VUE

# PROFITER DE LA CRISE DU TRANSPORT POUR RÉFORMER LE CONTRÔLE AÉRIEN EUROPÉEN

## LE FINANCEMENT DU CONTRÔLE DU TRAFIC AÉRIEN EUROPÉEN

Jusqu'en 1970, le contrôle du trafic aérien dit « en route », service public, était financé par les États et donc gratuit pour les « usagers ». À cette date, à la question, pas forcément explicitée, politico/économico/philosophico : les infrastructures doivent-elles être payées par le budget public puisqu'elles participent à l'essor de l'économie ou par les usagers ?, la réponse n'est pas la même suivant les modes de transport et pour le transport aérien, politiquement, vu comme un transport de « riches », c'est la deuxième option qui est choisie.

Le 8 septembre 1970, les sept États membres d'Eurocontrol ont signé l'accord multilatéral relatif à la perception de « redevances » pour l'utilisation des services et des équipements de navigation aérienne de route, sur la base du système adopté par la Commission de navigation aérienne de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) en juillet 1969. De plus, les États non-membres d'Eurocontrol ont signé des accords bilatéraux habilitant Eurocontrol à percevoir les redevances de route. En 1971, le Central Route Charge Office (CRCO) a commencé ses activités. Conformément aux recommandations de l'OACI, selon lesquelles le recouvrement de l'intégralité des coûts devrait être graduel, le taux de recouvrement des redevances de route Eurocontrol a commencé à 15% à partir du 1er novembre 1971. Ce taux a été porté à 30% le 1er novembre 1973, puis doublé à 60% le 1er novembre 1975. Le 1er octobre 1981, le taux est passé à 100%.

Les principes d'établissement de l'assiette des redevances de route et les principes de calcul des taux unitaires sont détaillés sur ce site :

<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/route-charges/reference-documents/eurocontrol-principles-updated-01-02-2018-fr.pdf>

On en trouvera ci-dessous une version simplifiée. Pour chaque vol, on calcule une Unité de service (UDS) fonction de la masse maximale au décollage (MMD) et la distance(D) parcourue par la relation :

$$UDS_{(route)} = \sqrt{\frac{MMD}{50}} * \frac{D}{100}$$

Une tarification ne tenant compte que du coût du service rendu aurait conduit à une redevance basée uniquement sur le temps de vol dans l'espace considéré.

La formule retenue par les États membres d'Eurocontrol de redevance de route proportionnelle à la distance parcourue et à la racine carrée de la masse de l'avion crée une certaine péréquation au profit des petits avions. Elle a ainsi le mérite de pouvoir être considérée comme un compromis entre le coût du service rendu et la capacité contributive des usagers. Une autre source de péréquation résulte de la non prise en compte de la vitesse des avions, mais elle est de moindre importance en raison de la relative homogénéité des flottes aériennes.

L'année N, l'organisme de contrôle prévoit pour l'année N+1 le trafic qu'il va contrôler et donc le nombre d'UDS. Il en déduit ses coûts ainsi que son taux unitaire.

Pour les coûts, il y a des règles pour définir ce qui peut être mis dans ce qu'on appelle « l'assiette des redevances », en gros les coûts de fonctionnement, les dotations aux amortissements ainsi que les intérêts sur leurs immobilisations non amorties. De plus, les États membres d'Eurocontrol ajoutent aux coûts du contrôle en route leur contribution au budget de l'Agence. Les coûts de fonctionnement sont, principalement, les salaires des contrôleurs et la maintenance des systèmes informatiques disparates, puisque chaque organisme a le sien.

Les organismes de contrôle transmettent au CRCO leurs taux unitaires et l'année N+1, celui-ci perçoit les redevances avec une facture globale par compagnie aérienne et reverse à chaque organisme de contrôle la part qui lui revient. En fonction de la réalité du trafic et des coûts, il y a un ajustement l'année N+2.

Donc depuis 50 ans, et jusqu'à la crise, un des avantages de ce recueil des redevances par la CRCO est que les États sont solidaires face à une compagnie aérienne qui serait récalcitrante à payer en bloquant ses vols au départ.

## LES LACUNES LATENTES DU SYSTÈME

Eurocontrol a créé dans la révision de sa convention en juin 1997, la Performance Review Commission (PRC) qui avait pour objectif de rendre publiques les performances des organismes de contrôle en Europe, ce qui permettait de créer une certaine émulation, ainsi qu'une « pression des pairs » vis-à-vis des « mauvais élèves ». C'est ce qu'on appelle la « sunshine regulation ».

## PROFITER DE LA CRISE DU TRANSPORT POUR RÉFORMER LE CONTRÔLE AÉRIEN EUROPÉEN

Depuis 1997, sous l'égide de la PRC, l'Agence Eurocontrol publie ainsi tous les ans un Performance Review Report : <https://www.eurocontrol.int/publication/performance-review-report-prr-2019>

La cible de ce rapport était à l'origine les politiques pour éclairer leurs décisions. Ce rapport qui fait maintenant plus de 100 pages s'est complexifié au point qu'il n'est plus accessible qu'à des experts. Comme son titre l'indique, ce dernier rapport sur la situation date de 2019, avant la crise, et donc n'est plus complètement d'actualité.

Plus de 10 ans plus tard, en 2009, la commission, lors du deuxième paquet de règlements SES a cherché à aller plus loin en créant une régulation économique forte avec des objectifs contraignants et des risques réels de pénalités financières en cas de manquement à ces objectifs de performances.

Cette deuxième régulation est de mise en œuvre difficile, avec des négociations triennales très conflictuelles entre la Commission européenne qui n'a pas la « compétence juridique » et les États qui sont juges et parties, sachant que ce seront eux qui devront faire face aux procédures d'infraction que la commission lancerait en cas de manquement vis-à-vis des objectifs.

En termes de coûts, les résultats sont mitigés (voir Figure 1).

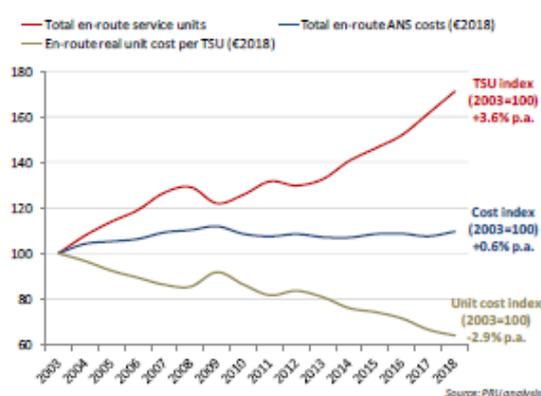


Figure 5-3: Long-term trends in en-route ANS cost-efficiency (€2018)

Figure 1 : Extrait de la Page 87 du Performance Review Report (ANS : organismes de contrôle de trafic aérien)

Les montants des redevances en-route ont baissé de 10% environ mais la baisse des taux unitaires n'est pas due uniquement à la régulation économique mais, mécaniquement, à l'augmentation du trafic. C'est grâce à

cette croissance du trafic que les organismes de contrôle du trafic aérien affichent une amélioration de la productivité qui n'est ...qu'un affichage.

Il n'y a ainsi aucune incitation à la rationalisation de ces systèmes informatiques disparates propres à chaque organisme. SESAR est la composante technologique du SES.

Comme l'a souligné le rapport de la Cour des comptes européenne (déjà mentionné) :

La réglementation adoptée par l'UE pour moderniser la gestion du trafic aérien apporte une valeur ajoutée, mais les financements étaient en grande partie inutiles

<https://www.eca.europa.eu/fr/Pages/DocItem.aspx?did=%7BB92E9AA1-0FE7-4CE6-8ED4-Bo4A4EoF42DD%7D>

Le volet du « déploiement de SESAR » (3 milliards d'Euro) n'a été utilisé que pour combler les surcoûts des échecs des programmes nationaux sans aucun objectif de réduire la fragmentation. Ces fonds européens ont, en réalité, augmenté la fragmentation en permettant aux monopolistes de cimenter leurs systèmes nationaux.

On peut aussi constater que, profitant des possibilités offertes par ces règlements, certains organismes de contrôle ont réussi à dégager des résultats excédentaires qu'ils ont pu garder et se retrouvent donc avec des excédents de trésorerie alors qu'ils n'ont pas pu faire face à la montée du trafic en 2017-2019, par manque d'anticipation dans le recrutement de contrôleurs.

Malgré cette régulation économique, force est donc de constater, qu'il n'y a pas de véritable incitation à baisser les coûts et, en particulier, à aller dans le sens d'une défragmentation, seule possibilité de réduction significative des coûts.

Au contraire, le changement de statut des organismes en prenant la forme d'un budget annexe, comme dans le cas de la France (seule dans son cas parmi les pays d'Eurocontrol), d'une entreprise semi-privée (cas de la Grande-Bretagne, seule pour l'instant dans cette catégorie) ou d'une entreprise publique (politique dite de « corporatisation » mise en œuvre dans tous les autres pays), les a transformés « en monopoles privés » dont le but n'est certes pas de satisfaire leurs actionnaires mais de perpétuer le système actuel sans incitation réelle à en

## POINT DE VUE

# PROFITER DE LA CRISE DU TRANSPORT POUR RÉFORMER LE CONTRÔLE AÉRIEN EUROPÉEN

améliorer l'efficacité.

Tout au plus a-t-il permis de réduire l'augmentation des redevances que ces échecs auraient inéluctablement entraînée.

Du point de vue égoïste de chaque des États, les redevances étaient payées en très grande partie par des compagnies aériennes « étrangères » au pays et donc considérées comme des rentrées de devises et peu leur importe ce que cela leur coûte, pourvu que la paix sociale soit obtenue, même avec des conditions que, par exemple, la Cour des comptes en France dénonce année après année ou, plus récemment, en 2018, le rapport d'information fait au nom de la commission des finances du Sénat sur la modernisation des services de la navigation aérienne, par M. Vincent Capo-Canellas : <https://www.vie-publique.fr/rapport/37451- rapport-dinformation-fait-au-nom-de-la-commission-des-finances-sur-la-m>

Néanmoins, en se plaçant au niveau européen, les compagnies aériennes européennes ont réalisé que c'étaient-elles qui payaient la grande majorité des redevances européennes.

Des études ont montré qu'à trafic égal, le système européen coûtait deux fois plus cher que le système aux États-Unis, surtout liés à la fragmentation organisationnelle et technique.

Voir le sixième rapport Comparison of air traffic management-related operational performance u.s./

Europe; le sixième rapport <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/us-europe-comparison-operational-performance-2017.pdf>

Si on ajoute le fait que les taxes de sûreté aux États-Unis sont payées par l'État fédéral et non par les compagnies, comme en Europe, les compagnies aériennes européennes ont commencé à se rendre compte de la distorsion de concurrence, avec le cas le plus extrême des pays du Golfe où les redevances sont nulles.

Malgré le fait que les organismes de contrôle doivent justifier leurs coûts auprès des compagnies aériennes, rien ne changeait.

En 2019, une nouvelle tentative a eu lieu avec le report of the Wise Persons Group on the future of the Single European Sky. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2019-04-report-of-the-wise-persons-group-on-the-future-of-the-single-european-sky.pdf>

Et, malheureusement, la crise est arrivée.

Pour réagir face à cette crise et en se fondant sur le Green Deal, [https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_fr)

la Commission Européenne a publié une proposition de révision des Règlements du Ciel unique européen : <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/legislation/com2020xxxx-proposal-ses.pdf>

De ces 136 pages, on peut citer, au moins, quatre points importants :

Revenues from en-route charges (€) - Monthly evolution  
- CRCO Area

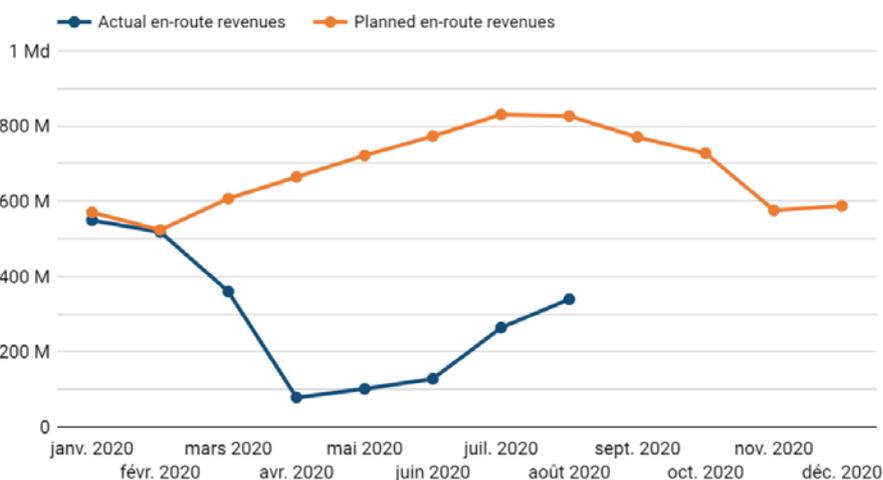


Figure 2 : Différence entre les redevances prévues et réelles

## PROFITER DE LA CRISE DU TRANSPORT POUR RÉFORMER LE CONTRÔLE AÉRIEN EUROPÉEN

1. Une nouvelle approche du schéma de performance avec une agence indépendante (hébergée par l'AESA) chargée d'évaluer et d'approuver les plans de performance des services de navigation aérienne en route.
2. Le dégroupage des infrastructures ainsi que des services météorologiques aux conditions du marché.
3. Des « autorités nationales de surveillance » indépendantes des organismes supervisés: (les organismes de contrôle du trafic aérien) en charge de l'application nationale de la régulation économique. L'autorité nationale compétente chargée de la supervision de la sécurité doit être indépendante.
4. Un rôle renforcé du gestionnaire de réseau.  
Cette nouvelle tentative sera-t-elle couronnée de succès ?

### L'IMPACT DE LA CRISE

Elle a immédiatement montré la perversité de ces coûts fixes répercutés sans contrôle et sans obligation de qualité de service vis-à-vis de clients captifs.

D'une part, les organismes de contrôle du trafic aérien européens pouvaient, au mieux, espérer des revenus des vols devenus plus rares avec les taux de redevances calculés en 2019 et d'autre part les compagnies aériennes ont estimé que les organismes de contrôle du trafic aérien qui ont profité de leur position de monopolistes depuis des années pouvaient faire un effort.

On peut voir Figure 2 la différence entre les redevances prévues et les réelles au cours de 2020.

Et de plus, les États d'Eurocontrol ont convenu d'un programme de report de 1,1 milliard d'euros pour aider les compagnies aériennes : <https://www.eurocontrol.int/press-release/eurocontrol-states-assist-airlines-11bln-de-ferral>

S'il n'y avait pas l'obligation d'assurer la continuité du contrôle du trafic aérien, les organismes de contrôle du trafic aérien européens auraient fait faillite. Pour ceux qui le pouvaient et, comme pour les compagnies aériennes, il y a eu des réductions de salaires. De même, il y a eu un soutien des États, sous différentes formes, pour régler le problème de trésorerie.

Par exemple en France, la Direction générale de l'aviation civile a fait un prêt de plus d'un milliard d'Euros.

Mais ce ne sont que des mesures à court terme et c'est le principe même des taux de redevances fondés sur des coûts fixes répercutés sur le trafic qui est condamné, au moins pour plusieurs années.

En effet, selon le principe des redevances, il faudrait en 2021 compenser les pertes de 2020 et rectifier les taux dans un rapport de 1 à 10 (???) en faisant payer les compagnies qui auront réussi à voler à nouveau.

On est donc bien face à un « mur du financement ».

### LE CONTRÔLE DU TRAFIC AÉRIEN VA-T-IL PROFITER DE CETTE CRISE POUR, ENFIN, SE RÉFORMER ?

Rien n'est moins sûr à en lire les déclarations de la plupart des organisations professionnelles, poussées en sous-main par les cadres des organismes, comme pour s'opposer au Ciel unique européen.

À une exception près, cet article : A New Normal for Air Navigation Services, par Luis Barbero, Guild of Air Traffic Control Officers (GATCO) et Tom Laursen, Danish Air Traffic Controllers' Association (DATCA) : <http://docplayer.net/190198539-A-new-normal-for-air-navigation-services.html> que nous nous permettons de citer entièrement en le traduisant :

*C'est avec inquiétude que la Guild of Air Traffic Control Officers (GATCO) au Royaume-Uni et la Danish Air Traffic Controllers Association (DATCA) ont observé que la plupart des discussions autour de la COVID-19 et de l'aviation ont été le retour le plus rapidement possible au confort du normal que nous avons connu. Quand le trafic va-t-il revenir aux niveaux pré-COVID-19 ? Quelle aide financière les États vont-ils apporter aux acteurs de l'aviation ? Ce sont les questions les plus fréquemment posées récemment. GATCO et DATCA suggèrent que nous utilisions cette crise pour poser des questions différentes, les plus difficiles; celles sur les limites du cadre réglementaire, financier et commercial actuel des fournisseurs de services de navigation aérienne (ANSP). En particulier :*

*- Comment finançons-nous les ANSP sur le long terme de manière durable ?*

*- Quel type d'ANSP voulons-nous à l'avenir ?*

*Si nous ne commençons pas à discuter et à répondre à ces questions maintenant, les conséquences seront bien connues de quiconque dans l'industrie européenne de la*

## POINT DE VUE

### PROFITER DE LA CRISE DU TRANSPORT POUR RÉFORMER LE CONTRÔLE AÉRIEN EUROPÉEN

gestion du trafic aérien (ATM) : un système dont les inefficacités se perpétuent d'une crise à l'autre. Comme on le dit couramment, il ne faut pas gaspiller une bonne crise pour réinventer une industrie. Si l'industrie dans son ensemble veut saisir l'opportunité de basculer ses propres fondations, il pourrait être utile de se rappeler et d'appliquer les concepts exprimés par le théologien américain Reinhold Niebuhr : ayons la sérénité d'accepter les choses que nous ne pouvons pas changer, le courage de changer les choses que nous pouvons et la sagesse de connaître la différence.

Les deux scénarios choisis par GATCO et DATCA sont des exemples et ne sont en aucun cas les seules options, mais ils ont été choisis pour déclencher un débat indispensable sur le système actuel. : un système 100% financé par l'État ou un système financé par l'État et les utilisateurs de l'espace aérien via les taxes et les redevances des usagers de l'espace aérien, par exemple une répartition 50/50 du financement.

Dans les deux cas, c'est le retour d'un financement étatique qui oblige à repenser le cadre institutionnel.

Au-delà de l'Europe, de nombreux États dans le monde ont opté pour ce mécanisme de recouvrement intégral des coûts pour les utilisateurs de l'espace aérien et ils souffrent tous de cette crise.

Par contre, la gestion des infrastructures de transport aérien est restée budgétaire et étatique. Aux États-Unis où elle relève de la Federal Aviation Administration, dans le cas d'une gestion budgétaire, les dépenses sont autorisées par le Congrès qui exerce sur elles le même contrôle que sur les autres dépenses publiques. Les « appropriations » budgétaires sont votées chaque année, sur la base des demandes présentées par l'administration avec le mode de contrôle, parfois un peu tatillon du Congrès américains sur l'administration, et sujet à des jeux politiques.

Il n'y a pas à proprement parler des recettes ou redevances mais des taxes, qui ont pour assiette principale des taxes sur les billets des passagers et sur le fret, ou sur les carburants pour les avions sans passagers ou fret.

Il y a donc une transparence complète sur ces taxes.

Il n'y a pas d'affectation de ces taxes aux dépenses, ni d'équilibre comptable : les taxes prélevées ont été parfois supérieures aux dépenses ou inférieures. Avec la crise, elles sont devenues inférieures.

Rien ne prouve que revenir à un système étatique national

serait la bonne solution en Europe avec des gouvernements, qui, notamment, en France, font preuve d'une certaine faiblesse vis-à-vis de leurs personnels, notamment les contrôleurs aériens.

### RÉINVENTER EUROCONTROL

Au début des années 60, les avions civils à réaction allaient voler plus haut que les avions à hélices et donc devoir partager cet espace aérien dit supérieur avec les avions militaires. René Bulin, le créateur et premier directeur général de l'Agence Eurocontrol, a réussi à faire créer une organisation intergouvernementale et son bras exécutif pour gérer cet espace aérien en commun.

L'histoire d'Eurocontrol que l'on peut lire dans cette publication. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-01/eurocontrol-history.pdf> est, du fait de sa dimension de souveraineté nationale, l'homothétie de l'histoire de la construction européenne.

La vision de René Bulin a été contrariée et, s'il en fallait une preuve, la charte qui régit le fonctionnement d'Eurocontrol. La Convention est toujours provisoire, car non ratifiée, et son « conseil d'administration » un Conseil provisoire. Il ne reste plus de la vision de René Bulin que le centre de contrôle de Maastricht et le Gestionnaire du réseau.

Pourquoi ne pas relancer comme le proposait le projet MOSAIC [http://www.atc.lu/local/MOSAIC\\_V5.pdf](http://www.atc.lu/local/MOSAIC_V5.pdf)

d'un service public européen pour la gestion du trafic aérien européen, avec un système technique européen qui serait la deuxième infrastructure réellement européenne après Galileo. Comme proposé dans le rapport déjà cité of the Wise Persons Group on the future of the single european sky, les technologies informatiques et de télécommunications disponibles (Clouds et télécommunications haut débit, non utilisées dans le contrôle du trafic aérien) permettraient d'aller vers un système « digital ».

On pourrait alors avoir, enfin, un contrôle du trafic aérien en Europe, moins cher et plus performant, dans l'intérêt des passagers et auquel les contrôleurs du trafic aérien pourraient adhérer.

À une condition, une gouvernance efficace que les États membres auraient le courage de mettre en place. ■

# Cyber menaces visant le transport aérien

par Raymond Rosso, membre de la 3AF et de l'AAE et Thierry Prunier, membre de l'AAE

La recherche d'une plus grande efficacité du transport aérien et la demande accrue des passagers d'accéder à de nouveaux services ont été rendues possibles par une large connectivité grâce à la numérisation croissante du monde de l'aviation. Mais cette connectivité risque d'affecter la sécurité des vols. Les risques liés aux cyberattaques ont considérablement évolué ces dernières années. Le milieu aéronautique s'est mobilisé pour faire face à ces menaces. L'AAE s'est penchée sur ce sujet afin de faire le point sur les risques encourus par le transport aérien face aux cyberattaques. Elle a publié le dossier 45, qui est téléchargeable en ligne sur le site de l'AAE.

Le monde du transport aérien forme un Système de système composé des éléments suivants : avions commerciaux, organismes de contrôle de la circulation aérienne, aéroports, centres de contrôle opérationnels des compagnies aériennes, usines de construction aéronautiques, motoristes, équipementiers, entreprises de maintenance aéronautique, réseaux de radiocommunications terrestres et satellitaires, moyens de radionavigation terrestres et satellitaires, moyens de surveillance.

Tous ces acteurs sont de plus en plus « connectés » et échangent entre eux des données essentiellement numériques. Ils sont également reliés à Internet et à des Clouds, ce qui risque d'introduire des failles potentielles utilisables par des cyber-attaquants.

Il convient de traiter la cybersécurité dans l'aviation civile commerciale avec une approche Système et cartographier les flux de données de bout en bout. L'analyse effectuée montre qu'il peut exister des vulnérabilités dans l'écosystème du transport aérien. Peuvent être cités les points de vigilance suivants :

- communications numériques entre le bord et le sol,
- équipements en cabine passagers participant au divertissement des passagers,
- équipements individuels (smartphones, tablettes, ordinateurs) qu'ils appartiennent aux passagers ou aux personnels navigants,
- liaisons de données au sol, avion à la passerelle ou au roulage,
- chaîne de maintenance des équipements.

Les attaques contre le transport aérien peuvent être par « déni de service » ou par brouillage, consistant à bloquer

la réception des signaux. D'autres attaques possibles sur les liaisons de communication peuvent résulter dans le leurrage avec la transmission de fausses données, soit au sol, soit à bord des avions. Suivant la corruption de ces données, les conséquences peuvent être sérieuses si aucun moyen de vérification de la disponibilité, de l'authenticité, de l'intégrité, de la confidentialité et de la traçabilité des informations n'est prévu. Ces attaques peuvent aussi concerner les logiciels opérationnels, à bord ou au sol. La présence de codes malveillants programmés pour déclencher des actions nocives à un certain moment est évidemment une menace importante.

Les menaces de cyberattaques ne visent pas seulement la sécurité des vols mais il existe aussi des menaces plus classiques d'attaques des systèmes d'information des opérateurs du transport aérien, compagnies aériennes, gestionnaires d'aéroports, fournisseurs de services. Il s'agit soit d'attaques de déni de service, soit de vol de données, soit de rançonnement. Ces attaques sont très nombreuses en particulier pour les gestionnaires d'aéroports : selon une étude récente de l'Agence européenne de sécurité aérienne, il y aurait en moyenne 1000 aéroports victimes de cyberattaques chaque mois dans le monde. Les attaques visant les compagnies aériennes sont probablement très nombreuses, mais elles sont rarement rendues publiques. Pendant la crise sanitaire, la compagnie EasyJet a fait l'objet d'une attaque avec vol du fichier clients incluant toutes les informations personnelles des voyageurs (9 millions de clients). Les compagnies British Airways, Cathay Pacific (9,4 millions de clients) et Air Canada ont été victimes d'attaques en 2018.

Les cyber-attaquants sont capables d'exploiter les failles dans les défenses fixes des systèmes, incluant les pare-feux (firewalls) et autres protections. Une protection physique, sans communication filaire ou radio, n'est plus possible dans un monde digitalisé et connecté. Cependant, quelques mesures assez simples peuvent permettre de ralentir la plupart des attaquants.

Ces actions de défense ont des répercussions sur l'organisation et la gestion des systèmes, et nécessitent la mise en place de ressources humaines dignes de confiance et compétentes dans les dernières technologies, incluant des hackers professionnels inventifs, et collaborant au mieux avec leurs collègues des organismes de cybersé-

curité des pays amis. L'Organisation de l'aviation civile internationale doit être leader et coordonner au niveau mondial toutes les activités contribuant à renforcer la cybersécurité dans l'aviation civile. ■

## COVID-19 et climatisation

par Jean-Bruno Kerisel, membre 3AF et André Colpart

*Cet article est paru dans la revue Experts n°150 en juin 2020. Il est reproduit avec l'autorisation du rédacteur en chef de cette revue que nous remercions. Jean-Bruno Kerisel est expert honoraire agréé par la Cour de cassation et président d'honneur du Conseil national des compagnies d'experts de justice (CNCEJ). André Colpart est expert agréé par la Cour de cassation et vice-président de la Compagnie des ingénieurs de Paris (CIECAP)*

Dans le cadre de l'apparition de la COVID-19, il semble évident que la circulation du virus se produit aisément dans un local où de l'air est recyclé en permanence, la COVID-19 étant susceptible d'être brassé. L'exemple du porte-avions Charles de Gaulle a montré la rapidité de la contamination dans ce contexte où l'air est constamment recyclé. Il apparaît nécessaire de faire le point sur les installations de climatisation et leurs risques potentiels.

Dans sa conférence de presse du 24 avril 2020, le professeur Jérôme Salomon, directeur général de la santé a déclaré que « Les autorités sanitaires avaient saisi des experts pour savoir si oui ou non nous devons prendre des mesures spécifiques face au risque viral et à la présence de climatisation ».

Les dangers de la climatisation ont été soulignés à plusieurs reprises, notamment par les médias.

Rappelons à ce sujet l'origine d'une maladie dont l'apparition a frappé les esprits voici près de 45 ans : la légionellose qui tient son nom d'un congrès de légionnaires à Philadelphie en 1976. Elle avait provoqué une pneumonie et le décès de vingt-neuf personnes, à cause de la climatisation mal entretenue d'un hôtel et du bacille qui a donné son nom à la maladie et qui s'était logé dans les gaines.

Dans le cadre beaucoup plus proche de l'apparition de la COVID-19, la contamination par ce virus le 26 février dernier de plusieurs personnes dans un restaurant climatisé à Guangzhou, en Chine, a également mis en cause la climatisation.

Il nous a donc semblé nécessaire de faire le point, dans le cadre de la dramatique crise sanitaire actuelle, sur les installations de climatisation et leurs risques potentiels.

### LA COVID-19

Nous savons encore assez peu de choses sur la transmission aéroportée de la COVID-19. Mais des études récentes ont montré que :

- La propagation du virus se fait par les gouttelettes libérées dans l'air plus ou moins loin lorsqu'une personne infectée tousse, éternue ou même simplement parle.
- Les gouttelettes pourraient également s'accrocher à des particules fines issues de la pollution, la durée de vie de cet attelage n'étant pas connue.

### LA CLIMATISATION

La climatisation est un terme générique qui recouvre le chauffage, la ventilation, le rafraîchissement (abaissement de la température de 4 à 5°C) et le conditionnement d'air (maintien d'une température et d'une hygrométrie).

Nous distinguerons différentes configurations :

**Ventilation mécanique contrôlée des logements, dénommée VMC** : L'air extérieur est introduit par des bouches généralement auto-réglables situées dans les menuiseries des fenêtres des pièces sèches et extrait dans les locaux humides (cuisine, salle de bains, toilettes). Elle est alors du type simple flux. Elle peut être aussi double flux avec une introduction d'air réchauffé et filtré. Le

risque de contamination reste dans les deux cas, très faible.

**Ventilation des locaux tertiaires et recevant du public :** bureaux, locaux d'enseignement et de restauration, locaux à usage sportif, établissements de spectacle, et hospitaliers, hôtels, magasins, etc. :

Les débits minimaux d'air neuf dits hygiéniques sont fixés par les règlements sanitaires et varient de 18 à 25 m<sup>3</sup>/h par personne.

L'air est préparé dans des centrales de traitement d'air (CTA) assurant sa filtration et son réchauffage en hiver. Il est ensuite diffusé dans les locaux par des gaines et des bouches. Il peut aussi provenir d'infiltrations, le local étant en dépression. C'est le cas par exemple de restaurants où l'extraction est réalisée par les hottes de cuisine.

**Rafraîchissement et/ou chauffage des locaux par des systèmes de pompes à chaleur :** Dans ces systèmes utilisant des unités intérieures de types divers, l'air est continuellement recyclé, chauffé ou rafraîchi selon les besoins, dans les locaux, principalement des bureaux et parfois des logements, qui bénéficient par ailleurs d'une ventilation.

**Conditionnement d'air de certains locaux tertiaires :** La température et l'hygrométrie intérieures sont alors contrôlées, hiver comme été, l'air étant traité dans des CTA plus complexes. Elles fonctionnent généralement, par mesure d'économie, avec une partie d'air recyclé.

## **AIR NEUF, AIR RECYCLÉ**

Il est évident que la circulation du virus se produit aisément dans un local où de l'air est recyclé en permanence, le virus de la COVID-19 étant susceptible d'être brassé.

L'exemple du porte-avion Charles de Gaulle a montré la rapidité de la contamination dans ce contexte où l'air est constamment recyclé.

Faut-il pour autant faire fonctionner les CTA uniquement en air neuf, réchauffé l'hiver et refroidi l'été ? Cela irait à l'encontre de la maîtrise des consommations énergétiques et aurait évidemment un coût considérable.

La qualité des filtres est également un problème. Les

filtres anciennement utilisés, de type G4, avaient une efficacité moyenne. Afin de retenir des particules fines de diamètre 0,4 µm, il faut au moins des filtres F7 qui ont une efficacité de 90 à 95% pour éliminer ces particules. Il est nécessaire que l'air recyclé soit également filtré avec la même efficacité minimale. Là aussi, on se heurte à de sérieux problèmes de coût.

On se rend compte que les recommandations pour se prémunir de la COVID-19 peuvent aller du simple renforcement des mesures d'entretien (changement des filtres) à des modifications de principe des systèmes de ventilation-climatization, par exemple le passage en tout air neuf ou l'adjonction de lampes à ultra-violet dans les CTA et les gaines pour stériliser l'air.

## **ÉCOULEMENT LAMINAIRE ET TURBULENT**

L'écoulement de l'air autour d'une personne est laminaire, c'est à dire sans variation spatiale, ou turbulent si le mouvement de l'air se fait dans des directions diverses.

Un écoulement laminaire peut être réalisé grâce à des bouches disposées judicieusement, et à une vitesse d'air faible à la sortie de ces bouches.

La contamination dans le restaurant de Guangzhou en Chine a été attribuée à un écoulement turbulent provenant du climatiseur fonctionnant en recyclage, situé juste au-dessus des convives.

La visualisation des écoulements de l'air, laminaire ou turbulent, est aisément réalisable avec des poires à fumée en différents endroits d'un local ventilé ou conditionné.

Au-delà des locaux, cette visualisation pourrait être effectuée dans les transports en commun où la densité de passagers est élevée. Il est à noter que dans les avions, le renouvellement de l'air neuf a lieu toutes les trois à six minutes, ce qui est plutôt rassurant.

## **CONCLUSION**

La question s'est posée, lors du confinement généralisé que nous avons eu à respecter, de savoir si tous les locaux où les personnes ne seraient pas à même de respecter la distanciation sociale, tels que des salles de spectacle, devaient réellement être fermés, comme cela a été décidé. Il existe en effet une grande différence entre un vieux cinéma de quartier mal ventilé et un cinéma multiplex,

## POINT DE VUE COVID-19 ET CLIMATISATION

muni d'une installation moderne permettant une diffusion d'air neuf filtré avec un écoulement laminaire.

Il sera sans doute nécessaire de procéder dans les locaux fermés recevant du public à un audit des installations de ventilation et de conditionnement d'air : CTA, gaines et bouches de soufflage pour prévenir une propagation de virus comparables à la COVID-19 qui pourraient apparaître dans l'avenir. Cet inventaire et les aménagements consécutifs gagneraient bien sûr à être effectués sans délai.

Pourquoi ne pas instaurer un label qui serait attribué sur la base de la qualité de l'air soufflé, sa filtration, son écoulement, etc. ?

### COVID 19 ET MOBILITÉ

*par Jean Baptiste Rigaudias, membre de la CT Aviation commerciale*

À défaut de voiture familiale, prolongement du logement, la mobilité fait utiliser d'abord les moyens publics de surfaces « de voisinage », taxi, autobus ou tramways, métropolitains ou trains de banlieues : ces « déplacements du quotidien » ne sont pas vraiment ceux du « voyage » qui sont notre objet. Tant que l'offre reste abondante (que l'activité économique reste réduite !), ils ne sont pas bondés, l'environnement n'y est pas différent de celui des rues où passants se suivent et se croisent. Les précautions à y prendre sont constamment l'objet des spécifications des pouvoirs publics : masque, gants, distance, rideau entre arrière et avant de taxi (faudrait-il spécifier pause entre deux courses ?).

Examinons les conditions une fois franchies les installations publiques que sont gares routières ou ferrées, ports ou aéroports : oublions les navires de croisière, lieux de vacances (qui reviennent là d'où ils sont partis) et les ferries, le plus souvent de trajet courts sur les ponts desquels chacun peut se tenir, et parfois de longue traversée, dont les aménagements s'apparentent, en plus denses, à ceux des autres modes.

Autocars, trains et avions semblent, malgré la faiblesse de la demande, bien remplis, sans doute parce que leurs opérateurs ont logiquement coupé les programmes.

Les aménagements les plus favorables des cabines se résument à peu de chose : dossiers suffisamment hauts pour faire écran d'un rang à l'autre, absence de siège vis-à-vis. Il ne s'agit absolument pas d'un avantage concurrentiel de l'un par rapport aux autres puisque l'un ne va en général pas où vont les autres !

Ainsi dans les autocars et les avions, les sièges sont tous dans le sens de la marche et, dans les avions, les dossiers cachent les têtes de la rangée de devant. Les trains présentent quant à eux des situations contrastées : certaines voitures des trains « intercités », sont aménagées en compartiments de sièges en vis-à-vis, 6 ou 8 selon la classe, et les autres et ceux des TGV, dits « en salle », disposent de quelques tables de 4 places (voire de 2 en première) qui placent leurs occupants en face les uns des autres (rien ne semble réserver de telles places aux membres d'une même famille).

À noter que les « premières classes », d'avion comme de train, laissent davantage d'espace entre chacun.

Il existe encore une différence de taille provenant de l'espace dans lequel tous ces moyens de transports se déplacent : les moyens de surface traversent en particulier des zones urbanisées dans lesquelles les résidents respirent : par contraste, l'avion se déplace en espace absolument vierge de toute respiration. Son stationnement, même en aéroport, ne voit qu'un mécanicien et un pilote faire son tour, l'un après l'autre, et un tractiste le repousser.

Reste alors la climatisation : celle de l'avion renouvelle intégralement l'air de la cabine avec de l'air extérieur, là où aucun virus ne risque de se trouver, en 3 minutes, et ses filtres, comme la rappelle la directrice générale d'Air France il y a peu, ont les caractéristiques de ceux installés pour les salles d'opérations chirurgicales.

Les situations sont, en termes de protection sanitaire, assez différentes selon le moyen que chacun est amené à utiliser pour aller d'un endroit à un autre : à chacun, selon le voyage qu'il doit faire, de se prémunir pour lui-même et pour les autres, afin que soit évitée une mesure supplémentaire de confinement préjudiciable à l'économie et aux modes de vie.

Reste qu'au-delà de l'aménagement, tous dans un même sens par exemple, dossiers protecteurs, renouvellement rapide de l'air extérieur hors zones urbanisées, filtration efficace, le virus est apporté par ceux qui sont réunis : chacun donc, qui n'aurait pas

réservé avec ses voisins, doit rester dans l'alignement de son siège, porter son masque comme l'exploitant le prescrit, et désinfecter ses mains ou ses gants avant, pendant et après son voyage ! ■

## Maîtrise de la *data* et retour des États : vers une égalité souveraine reconnue autre leçon du dossier Airbus

par Philippe Mueller Feuga, membre 3AF

*Philippe Mueller Feuga est secrétaire général du Club des Officiers de sécurité (CLOS), ancien responsable de la Mission Protection du secret (MPS/HFDS/SGDSN), auditeur au Contrôle général économique et financier des Ministères économique et financier et membre du Groupe de travail sur le rôle des territoires non coopératifs dans la déstabilisation de la finance mondiale, membres du Comité scientifique de l'EFCSE (European Federation of CyberSecurity Experts), du Cercle K2 et de la Commission Digital Défense de l'IHEDN.*

La dixième convention judiciaire d'intérêt public (CJIP) conclue depuis l'adoption de la loi n° 2016-1691 du 9 décembre 2016, dite « loi Sapin 2 » relative à la transparence, à la lutte contre la corruption et à la modernisation de la vie économique a été homologuée le 31 janvier 2020 entre Airbus SE et les magistrats de trois pays, le Parquet national français (PNF), le Serious Fraud Office britannique (SFO) et le Department of Justice américain (US DoJ). Le premier est de culture civiliste, les seconds de la *common law* avec un avantage pour ces derniers, adeptes du *deferred prosecution agreement (DPA)* suite à la reconnaissance d'une culpabilité dans le cadre d'un *guilty plea* (plaider coupable).

Le montant total des amendes est de 3,02 Mds €. Le DPA est un complément de la CJIP qui est un accord de poursuite différée, avec suspension de toute poursuite sous condition d'accepter une mise en conformité (*compliance*) sous surveillance (*monitoring*) dans un délai accepté, suite à quoi il est prononcé l'abandon de toute poursuite sur l'entité morale – sous le contrôle de l'Agence française anticorruption (AFA), créée à l'occasion du vote de la loi Sapin 2 et dotée d'un pouvoir administratif de contrôle.

La CJIP met fin aux litiges visant la personnalité morale, en l'espèce sous statut de société européenne (SE). L'avionneur, succès du modèle européen d'intégration industrielle, est au cœur du contentieux Airbus/Boeing, à la fois symbole des *intérêts essentiels* européens et des rivalités commerciales entre l'Union européenne et les États-Unis : Airbus SE se trouve ainsi libéré de ne pas avoir à répondre à une longue enquête suivi d'un long procès, forcé à l'issue aléatoire, sans inscription au casier judiciaire – inscription aux conséquences importantes (exclusion des marchés publics, interdiction de certaines activités, etc.). Le dossier pose toutefois la question de l'intérêt national, ou de la défense des *intérêts essentiels* européens, moins sous l'angle purement éthique qui s'imposerait dans un monde idéal, que sous celui de *guerre économique* ou de *concurrence déloyale (unfair competition)* dans la situation du marché aéronautique à forte concurrence, avec une puissance publique absente ou *désarmée* bien que garante de la sécurité nationale, économique ou numérique.

Le présent article souligne l'importance des *intérêts essentiels* retenus dans une analyse conceptuelle née d'observations par une approche économique du droit rattaché à un marché initialement limité ou

## POINT DE VUE

### MAÎTRISE DE LA DATA ET RETOUR DES ÉTATS : VERS UNE ÉGALITÉ SOUVERAINE RECONNUE, AUTRE LEÇON DU DOSSIER AIRBUS

faussement ouvert, devenu *global* : nécessité oblige d'une part, face à la complexité théorique émanant de la science juridique sur les réalités, notamment celles du passage du territoire national à une dimension globale animée par des pratiques économiques internationales *post* 1991<sup>1</sup> (application extraterritoriale d'un droit interne en matière de corruption comme le FCPA américain voté en 1977, mais très actif à partir des années 1990 ; et autres réglementations d'interdiction, telles Helms-Burton pour Cuba et Amato-Kennedy pour l'Iran en 1996 ; contrôle d'exportations sensibles, type ITAR ou AECA ; ou contrôle des marchés financiers assuré par la SEC) ; d'autre part, en raison de la prise en considération de normes souveraines issues du pouvoir législatif au regard de décisions prises par le pouvoir exécutif élargi au pouvoir juridictionnel (l'US DoJ). Avec deux phénomènes conséquents : i) celui de la confrontation de deux systèmes de tradition différente, celle de la *common law* et celle de tradition romano-germanique, dit civiliste ; ii) celui d'un État passif ou *désarmé* au moment où la *confrontation systémique* se pose. Passivité observée sur le dossier Airbus SE tant à Paris qu'à Bruxelles, à l'inverse du rôle du gouvernement travailliste de Tony Blair (1997-2007) invoquant l'intérêt national face à l'US DoJ sur le dossier BAE Systems (décembre 2006) pour un marché estimé à 43 Mds £ (86 Mds US\$).

Et ce, en France, malgré la loi de 1968, dite de *blocage*, *loi-écran* soumise (sans effets) aux prétentions de la procédure américaine dite de *discovery* ou phase précontentieuse d'instruction préalable à tout procès civil ou commercial ; cette procédure vise à rechercher, voire à exiger, la production de tout élément ou information utiles en tant que *preuve au litige*, indépendamment des mécanismes de coopération judiciaire prévus par la Convention multilatérale de La Haye (1970). Sachant que le pouvoir exécutif et juridictionnel français a déjà l'expérience de la cohabitation, celle entre droits internes et droit européen – celui des contrats ou celui des obligations soit selon des intérêts individuels devenus plus cohérents (depuis 2001), soit dans le cadre de la concurrence marquée par la moralisation de pratiques commerciales (depuis 2003). Cette cohabitation transpose les normes, règles ou coutumes internationales *ante* 1945, alors qualifiés de « *simples faits* », vers leur intégration dans l'ordre juridique national.

L'expérience de la première *confrontation systémique* est vécue avec l'élargissement de l'Union européenne et la consolidation d'un ordre juridique européen : c'est l'euphémisation du droit dont la maturation a commencé dans les années 1980 avec la prééminence reconnue du droit international sur la *souveraineté de la loi nationale*, celle-ci émanant du pouvoir législatif (arrêt Nicolo, 1989). En l'espèce, il s'agit de la primauté du droit européen. Effet d'une mondialisation en cours, à commencer par la formation de grandes unions de nature économique régionales apparues concomitantes au multilatéralisme et capables de créer des ordres juridiques propres (CEE, ASEAN, Mercosur, etc.) : l'intégration dans les ordres juridiques nationaux se pose subséquente à leur pérennité supranationale. Avec une extrapolation, possible mais contestable, débattue entre spécialistes en Europe, la tentation supranationale considérerait la forme de l'État, en tant qu'entité de gouvernance dans un monde globalisé, dépassée, voire en voie de dépérissement...

Nonobstant le fait que sans État, point de souveraineté, et sans souveraineté point de sécurité, trois paramètres aboutissant à l'absence d'une *volonté de puissance*. N'est-ce pas la leçon à retenir de la dernière CJIP, avec la prise en compte d'un rapport de force favorable au *leadership* américain, *by default*. Comme peut en témoigner l'absence de réactions européennes, ainsi que françaises, allemandes ou espagnoles à la condamnation d'Airbus SE dans le contexte de tensions commerciales transatlantiques. Bref, qu'attend l'Europe pour protéger ses fleurons, ou plus généralement pour réagir quand ses parts de marché sans menacer ? Et quid du principe de réciprocité ? Contradiction flagrante dans un ordre mondial partagé de part et d'autre de l'Atlantique fondé sur les principes westphaliens d'États souverains (ou *unités politiques* pour Raymond Aron) reconnus par l'ONU au titre de l'art. 4-1 de la Charte, et sur des valeurs universelles d'origine occidentale. En distinguant celles d'origine américaine de celles européennes, cet *ordre* ou *équilibre mondial*, par nature précaire, est fortement teinté d'un universalisme influencé par les États-Unis. Il serait toutefois actuellement tenu en échec, selon Henry Kissinger (2020), suite à l'émergence dans l'après-guerre froide (1947-1991) d'autres universalismes. Ils sont revendiqués par des États autoritaires ou à parti unique :

<sup>1</sup> L'extraterritorialité du droit américain a pris une tournure plus globale après la fin de la guerre froide en 1991. Elle était plus limitée, avant la chute de l'URSS, avec le CoCom (1949) aux pays de l'OTAN, élargie aux pays de l'OCDE (1989-1990). Le CoCom est remplacé en 1993 par l'accord de Wassenaar incluant la Russie sur les technologies sensibles et relatif au comportement « irresponsable » d'États voyous » (*rogue states*).

## MAÎTRISE DE LA DATA ET RETOUR DES ÉTATS : VERS UNE ÉGALITÉ SOUVERAINE RECONNUE, AUTRE LEÇON DU DOSSIER AIRBUS

celui de la République populaire de Chine partisane d'une *harmonie sociale* possible par la surveillance de masse ; et celui de la République islamique d'Iran adepte d'un *seul légitime pouvoir autour du message du prophète Mohammad qu'il voulait étendre au monde entier*. Ces autres *universalismes* s'opposent à l'universalisme en tant que vision distincte de l'ordre mondial conçue par les États-Unis, convaincus de leur messianisme (ou Manifest Destiny de 1839) : l'application universelle d'une interaction liberté/responsabilité de citoyens nés égaux (une égalité des conditions ou égalité des chances, selon Tocqueville) au sein d'une démocratie représentative ; non sans arrière-pensée économique en vue de libéraliser l'accès aux marchés, et ce en appliquant le principe de *nation building*.

La seconde confrontation systémique repose sur l'ordre international de la loi qui s'établit, le *code* devenant un enjeu de pouvoir en vue de s'en assurer un contrôle total. Une sorte de légitimation de la suprématie économique par le fait que *code is law*. Non sans ambiguïté pour la CJIP introduite en 2016 puisqu'elle reconnaît un ordre externe, celui de l'autorité de la justice américaine ou *rule of law – statute law* ou *common law* – constitutive par sa formalisation croissante, en toute logique transitive, d'un État de droit, devenu une référence majeure dans les années 1980. Cet ordre fait référence à un État rationnel (*Verstandesstaat*, selon la doctrine juridique allemande apparue en 1798 réaffirmée en 1832), voire pragmatique dont le fondement est la plus grande liberté de citoyens responsables telle que la Constitution de 1776 la garantit : limitation constitutionnelle du domaine du pouvoir de l'État (fédéral) ; élimination des obstacles externes à l'épanouissement des libertés ; et protection de la liberté individuelle et de droits fondamentaux (*Habeas Corpus*) faisant référence à la *responsabilité individuelle*. Dans cet ordre d'idées replacé dans un monde de commerce idéal où la concurrence déloyale est bannie, se pose la question de la soumission au droit de toute puissance publique et du contrôle de la légalité.

L'Union européenne, depuis 1948, apparaît en retrait, et devoir subir un *compte-à-rebours* sous de nouvelles menaces globales liées aux transitions démographiques et écologiques (développement durable et préservation de l'environnement telles qualité de l'air et lutte contre le CO<sub>2</sub>, voire sécurité sanitaire élargie à celle alimentaire) selon Hubert Védrine (2019), aux relents du Club de Rome et de son rapport *Halte à la croissance* (1972). À ces

menaces, viennent s'ajouter la transformation numérique et une possible convergence juridique, inexorable sous l'influence des marchés financiers, et sous de prétextes éthiques (comme la lutte anti-corruption). L'une ne va pas sans l'autre : la convergence juridique se dessine-t-elle par l'extraterritorialité du droit américain, et avec le recours probable à des arbitrages privés pour régler un différend entre un État et un investisseur privé. Ce qui risque de limiter la capacité de l'Union européenne et des États-membres à légiférer (sur les normes sociales, fiscales, sanitaires et environnementales) pour éviter à devoir verser des dommages-intérêts ? Quant à la transformation numérique, après avoir perdu la bataille des infrastructures, puis celle des grands opérateurs (GAFAM américains ou BATXH chinois), est-il encore possible de conserver la maîtrise de ses *données essentielles ou stratégiques*, donc la souveraineté numérique ? Le dossier Airbus SE y répond négativement : le PNF s'est aligné sur les méthodes de l'*US DoJ*, tandis que les éléments de *preuve* lui ont été transmis par CD-Rom, copies de milliers de documents ou messages électroniques. S'agit-il d'enfermer l'action d'autorités publiques dans un cadre de droit externe pour se prémunir contre l'arbitraire national par divers contre-pouvoirs ? Même si ce cadre apparaît garantir les droits fondamentaux individuels et collectifs dans un État de droit, l'extraterritorialité du droit américain reste malgré tout un modèle théorique à deux limites : quel serait le sommet de la hiérarchie des normes internationales ? et quelle serait la meilleure mise en œuvre du droit extraterritorialisé, notamment en matière de sécurité juridique et de preuve ?

En apparence, cette extraterritorialité donne un avantage sur les valeurs démocratiques européennes bâties sur un *legacy* historique marqué par le passage de la coutume à l'acte de codifier le droit, notamment dans la France héritée des *Lumières* et partisane de la Raison, c'est-à-dire d'un code idéal émanant d'une autorité législative forte, donc étatique, selon Max Weber, reconnue sur un territoire, national ou européen. Or, toute évolution y est lente, peu adaptée à une société en mouvement, à une économie plus ouverte. D'où les confrontations observées : avec le droit civiliste, une dichotomie s'installe entre les tenants d'un droit idéal, souvent outil de pouvoir ou de l'État concomitant à la réalisation de l'État-nation (réalité juridique aux États-Unis, puis en France mais, comme nous le constatons <sup>2</sup>, dans des

<sup>2</sup> Cf. *L'intégration républicaine. Essais de théorie politique*, de Jürgen Habermas, Fayard, 1998, 386 p.

## POINT DE VUE

### MAÎTRISE DE LA DATA ET RETOUR DES ÉTATS : VERS UNE ÉGALITÉ SOUVERAINE RECONNUE, AUTRE LEÇON DU DOSSIER AIRBUS

conditions bien différentes quant à la manière pour l'État d'exercer ses prérogatives); et ceux d'un droit ou *common law* adapté aux justiciables. Le premier droit traduit l'exercice d'un pouvoir législatif biaisé ou approprié par quelques-uns faute d'une réelle représentativité ; le second plus proche des réalités populaires et des intérêts nationaux<sup>3</sup>. Cette dichotomie oppose les tenants d'un code jugé parfait (code utopique), idéal de justice et d'égalité mais conduisant à une confusion entre égalité et équité, inspiré par les philosophes – et donc reproduisant une autre forme de despotisme (Savigny) ; et ceux favorables à un système de justice où la place du peuple (*Volksrecht*)<sup>4</sup> est au centre du processus de législation, plutôt proche de l'esprit d'une nation (conception du *Volksgeist*, selon Wilhelm von Humboldt), ce qui donne un avantage relatif aux États-Unis, comme le montre l'observation de la montée de l'État de droit des années 1980, et la dessaisie de certaines prérogatives régaliennes en Europe au profit de la pratique de la conformité (*compliance*) sous contrôle d'autorités administratives indépendantes (AAI).

**Avantage inversé au détriment des États-Unis** en raison de la marchandisation de toute relation humaine, telles les données personnelles ou les droits d'auteur, mais refusée par l'Union européenne. D'où des divergences d'appréciation en raison d'une compréhension plus pragmatique des réalités, côté outre-Atlantique, sur la nature du capitalisme financier et des fonds d'investissement spéculatifs, dominés – depuis les années 1980 de la *deregulation* – par le court-termisme et l'activisme actionnarial<sup>5</sup>. Faut-il toutefois accepter cette CJIP au détriment de nos intérêts, sorte d'assurance donnée à l'*US Doj* un demi-siècle après l'échec de la loi dite de *blocage* ? Au nom de la concurrence et de la reconnaissance du droit américain ? Divergence d'appréciation en termes de concurrence sur les marchés mondiaux, de protection de nos *intérêts essentiels* et de sécurité nationale.

Dans cette rupture schumpétérienne tournant le dos à deux siècles de croissance industrielle, les États-Unis consolident leur avantage par l'émergence d'une nouvelle économie *data-driven*, accentuée par l'*Internet des objets* (*IoT*) ou par des techniques, tels le *cloud* ou la *high-frequency trading* (*HFT*). D'où une confrontation

systemique plus rude que la première sur la question de l'adaptation ou de l'accompagnement du droit dans les mutations en cours, dominées par la dématérialisation des supports, la désintermédiation dans l'exécution des contrats ou l'émergence d'une justice prédictive grâce aux nouveaux outils technologiques (telle la *legaltech*), au point que *law is code*. Partagée entre la confrontation de cadres de règles juridiques en vigueur sur un territoire, comme l'espace européen ou EEE, et l'émergence de nouveaux concepts juridiques portés par l'extraterritorialité du droit américain – non sans un idéal du *rule of law* et une certaine éthique teintée de rouerie –, la transformation numérique crée une réalité augmentée ou cyberspace, construit autour de flux (composés de réseaux de réseaux interconnectés et de *data* soumises à l'IA) et de stocks de *data* très diversifiés en type de supports (mémoires, *clouds* et *data centers*). Impression de chaos généralisé, mais parfaitement maîtrisé par les *Big Five* (GAFAM ou BAXTH) en termes de sécurité juridique et de traçabilité de la *preuve convaincante* dans une convergence acceptée par l'Union européenne. Ce qui relance le débat sur la performance économique de la science juridique entre les deux principales traditions, la *common law* et le droit civiliste.

Mais aussi sur leur finalité, la *common law* étant plus adaptée à concevoir la sécurité globale assurée *by default* par les États-Unis – qui l'utilisent également à des fins de sécurité nationale –, que le droit civiliste alors que l'Union européenne n'assure même pas sa sécurité régionale, et que la France se trouve affaiblie dans sa position stratégique en reconnaissant le droit européen comme norme supérieure, même en défendant l'idée d'une exception constitutionnelle française. Que vaut le concept de sécurité nationale ou de défense des *intérêts essentiels* s'il n'existe aucune protection du secret ou de l'*information sensible* au sein des entreprises stratégiques ? La question reste posée pour la BNP-Paribas, pour Technip, pour Alstom comme pour Airbus SE, et les autres sociétés européennes. Que fait l'Union européenne pour la sécurité globale ? Sans pour autant se satisfaire de la toute-puissance américaine et de ses armes économiques. Le sort de l'euro, victime collatérale des *subprimes*, montre la duplicité des États-Unis par un interventionnisme ciblé durant la crise de 2008-2012.

<sup>3</sup> Cf. *De la coutume au code: Résistances à la codification du droit civil à Neuchâtel sous l'Ancien régime*, Adrien Wyssbrod, 2019, 359 p.

<sup>4</sup> Cf. *The German Historicist Tradition*, de Frederick C. Beiser, OUP Oxford, 2011, 600 p.

<sup>5</sup> La thématique de « l'activisme actionnarial » est une tendance grandissante : elle se veut éthique ce qui conduit des fonds comme Elliott et Third Point à demander des comptes aux entreprises.

## MAÎTRISE DE LA DATA ET RETOUR DES ÉTATS : VERS UNE ÉGALITÉ SOUVERAINE RECONNUE, AUTRE LEÇON DU DOSSIER AIRBUS

Cette démarche apparaît à la fois dogmatique du marché et pragmatique du droit, propre à la suprématie des États-Unis. Elle prévoit des programmes de mise en conformité (*compliance*) sous surveillance (*corporate monitors*), imposés à Airbus SE, mais aussi dans le passé à BNP-Paribas, Siemens, Alstom, etc. C'est une forme d'*intelligence* juridique au même titre que l'*intelligence* économique qui donne à l'Administration américaine cette *agilité* (dès 1993) à l'opposé du *tempo* décisionnaire français ou européen. Cette possible adaptation constante aux forces du marché, non sans pragmatisme, assure aux États-Unis leur *hegemon*, jadis avec le dollar *our currency, but it's your problem* (John B. Connally, 1971), puis l'extraterritorialité de leur droit (*lawfare*), et à présent *data is digital*. Premier élément de l'équation numérique qui conduit à la *data supremacy*, symbolisée sur le champ de bataille par le F35 Lightning (*data collected by sensors are shared*). Étrange engrenage des forces supposées *naturelles* des marchés, selon la métaphore de la *main invisible*, sur le consentement ou la fixation de prix par l'utilisation d'algorithmes, telle une *main virtuelle* assurée par l'expansion infinie du cyberspace : la capture de la rente informationnelle influe sur le contrôle de la *data*, les conditions de la libre-concurrence et tout processus de prise de décision.

À partir du dossier Airbus SE, l'objectif de cette contribution n'est ni de développer une approche conceptuelle sur la souveraineté de l'Union européenne, ni de construire une théorie de la concurrence déloyale (ou *unfair competition*) au regard de la responsabilité, ni de justifier ou condamner l'extraterritorialité d'un droit national, mais de démontrer qu'il est impossible qu'une telle extraterritorialité, fût-elle sous considération éthique, malmène la souveraineté d'un État, et menace ses *intérêts essentiels*. De surcroît, un État de droit. Formulé autrement : il s'agit ici d'aborder la notion de souveraineté en tant que norme au concret par la prise en compte d'*intérêts stratégiques*, fut-elle devenue insignifiante, ou sous la menace de la disparition supposée des États. Une souveraineté externe, reconnue selon un pragmatisme (*Realpolitik*) où le concept de sécurité globale se conçoit, et se partage selon le principe d'égalité souveraine sans imposer le second élément de l'équation numérique : *comply or die*. ■

# Compte-rendu du Forum Fédération du 3 octobre 2020

par Damien Hartmann, membre 3AF, président d'Open Space Makers

Le 3 octobre dernier, l'association Open Space Makers organisait son Forum Fédération annuel, qui donnait une tribune aux parties prenantes impliquées dans le développement de l'initiative Fédération lancée par le CNES. Cela a été l'occasion pour toutes et tous de constater l'évolution et la riche activité de Fédération sur l'année écoulée.

Plus de 70 participants ont assisté à la conférence en ligne, qui a pris la forme d'une série de courtes présentations réparties sur 2 heures, et qui ont été suivies de plusieurs sessions parallèles consacrées à différents projets.

Les projets eux-mêmes étaient fortement représentés. Le projet **Marsproof** de création de démonstrateurs de production de ressources in situ martiennes a notamment évoqué les partenariats signés avec l'Association Planète Mars et le centre de formation par l'apprentissage Mecavenir. Au travers de ce dernier, une vingtaine d'étudiants de 5e année de master génie industriel vont contribuer à la réalisation de prototypes de concasseurs, convoyeurs et autres engins nécessaires à l'extraction et à la transformation de ressources sur Mars. Ces activités côtoient une recherche bibliographique en profondeur pour établir à la fois un panorama exhaustif des connaissances humaines de Mars, et une vue complète de l'état de l'art des différentes « briques » de l'ISRU martienne, en commençant par leurs applications terrestres.

Le projet **Ad Astra** de lanceur open source réutilisable a présenté ses avancées, et notamment son organisation autour de trois principaux cercles focalisés sur la mécanique, l'électronique et modélisation & simulation.

Le système de séparation électrique d'étage et le système de récupération par parachute guidé, tous deux développés principalement au FabLab de Château-Thierry, ont été abordés sous l'optique du test de prototypes prévu cet automne dans une mini fusée.

L'ordinateur de bord modulaire BGC, premier projet à avoir reçu un financement Fédération, a été présenté avec des photos de l'assemblage des composants de ses deux premiers prototypes, qui vont être testés dans les prochains mois.

Ces projets soulèvent bien entendu la question du contrôle des exportations, sujet sur lequel intervient le Cercle Réglementation de l'association. Un travail important de pédagogie est mené vis-à-vis des projets susceptibles de tomber sous le coup de la réglementation sur le contrôle des exportations, et puisque ceux-ci ne pourront très certainement pas être publiés en open source, un travail est entamé pour créer une licence spécifique qui sera gérée par l'association. Quoi qu'il en soit, ces projets sont menés à titre préventif de façon « privée », ce qui implique que seuls les membres de l'équipe projet ont accès au contenu et aux échanges.

Le lien a été aussi fait avec les FabLabs et autres tiers-lieux qui hébergent les projets Fédération : les participants ont pu faire une visite virtuelle du **FabLab de Château-Thierry**, ils ont aussi découvert les activités et moyens de l'**ElectroLab**, la philosophie de l'**InnovSpace de l'ISAE-SUPAÉRO**, l'ancrage telecom du **FabLab de Lannion**, les activités pédagogiques du **Technistub**, etc.

Le **Cercle Mixité et Inclusion** lancé cette année a présenté ses axes de travail pour accroître l'implication des femmes dans les projets Fédération. Nous fixons des actions concrètes pour s'assurer que l'opportunité de rejoindre les projets est réellement ouverte à tous les humains, et pas uniquement à ceux issus de formations supérieures techniques.

Les groupes thématiques ont aussi montré comment des idées innovantes peuvent être incubées, développées et se transformer en projets concrets. Le **Groupe Thématique Exploration de la Lune** a notamment présenté l'idée (et le dossier associé) que l'équipe a soumise en réponse à l'appel à idée de l'ESA pour des charges utiles pour les futures missions lunaires, avec un concasseur dérivé des travaux effectués dans le cadre MarsProof. L'idée a été très bien reçue par les examinateurs de l'ESA et est en cours d'affinage.

Le **Groupe Thématique Exploration de Vénus**, même s'il travaille sur un astre plus éloigné, a évoqué des idées de missions concrètes à la fois dans la haute atmosphère de la sœur jumelle de la Terre, et des idées de rovers entièrement mécaniques pour l'exploration de la surface. Tout en faisant le lien avec l'ADN « maker » de Fédération

## COMPTE-RENDU DU FORUM FÉDÉRATION DU 3 OCTOBRE 2020

et en présentant une vidéo d'un petit démonstrateur d'un de ces concepts de rover, réalisé avec des moyens domestiques.

Le premier lien du **Cercle Projet** a expliqué comment l'association accompagne les porteurs de projets dans les différentes phases de la vie d'un projet, de l'incubation de l'idée jusqu'à son passage en vitesse de croisière, en passant par les actions d'aide méthodologique et de soutien aux projets en difficulté.

On a notamment vu avec beaucoup d'enthousiasme la reprise par une nouvelle référente du **Projet Dryade** de chasseur de débris spatiaux, l'initiateur du projet l'ayant quitté, faute de bande passante sur les deux dernières années. Cela illustre parfaitement le rôle de Fédération d'assurer la résilience et la capacité à rebondir des projets, en permettant à des nouveaux contributeurs de construire sur ce qui a été lancé par d'autres.

La question s'était d'ailleurs posée de bâtir le projet **Space Servicer** sur la base du projet Dryade ; mais finalement le choix a été fait cet été de lancer ce module de service multifonctions/multiorbites pour actifs spatiaux comme nouveau projet dédié. Son ambition est très large : créer une plateforme orbitale standardisée qui pourra à la fois servir à des missions de fabrication en orbite, de ravitaillement, de maintenance d'autres satellites, etc.

Pour conclure sur les projets orbitaux, l'association était très fière de présenter le projet **PHOENIX** d'infrastructure informatique mutualisée (cloud) orbitale, qui va devenir un projet structurant pour Fédération. Basée sur des standards ouverts, elle offrira des services espace-espace et espace-sol. Et la roadmap est ambitieuse : l'équipe vise la mise en orbite d'un premier nœud en 2023 !

Les nombreux retours reçus ont témoigné de l'enthousiasme général qui se dégageait des présentations, et de l'impression d'optimisme global vis-à-vis du futur de Fédération. Permettre à n'importe qui, sans exigence de compétences, de diplômes, de ressources ni de réseau, de contribuer réellement à la conception de systèmes spatiaux, et de les envoyer en orbite terrestre et au-delà, c'est là la vision Fédération, et au travers du Forum elle est apparue très concrète. Tout cela en commençant par franchir la porte du FabLab le plus proche de chez soi, en rejoignant l'association Open Space Makers, et en combinant énergie, méthode et passion ! ■



**FEDERATION**  
Open Space Makers

# Le plan de relance aéronautique à l'ONERA

par Philippe Beaumier, directeur aéronautique à l'ONERA



Philippe Beaumier

## L'ONERA ACTEUR DU PLAN DE FILIÈRE VIA LE CONSEIL POUR LA RECHERCHE AÉRONAUTIQUE CIVILE (CORAC)

Le 9 juin 2020, Bruno Le Maire, ministre de l'Économie, des finances et de la relance, annonçait un plan de relance destiné à soutenir le secteur aéronautique fortement impacté par la crise sanitaire. Doté d'un effort global de 15 milliards d'euros, ce plan d'urgence doit permettre la construction d'une industrie aéronautique décarbonée. Cette annonce constitue une formidable accélération des ambitions du secteur pour réduire l'empreinte environnementale et l'impact climatique de l'aviation.

Un simple regard sur les trois volets de ce plan (volet 1 : sauver les emplois ; volet 2 : transformation des PME ; volet 3 : décarbonation) souligne son caractère inclusif pour la filière, dont la réussite dépendra essentiellement de la mobilisation de l'ensemble des acteurs (organismes de recherche, grands industriels, PME, sous-traitants).

Le volet 3 du plan fixe comme objectif de parvenir à un avion neutre en carbone en 2035, notamment grâce à des moteurs à très haut taux de dilution et au recours à l'hydrogène comme combustible en lieu et place du kérosène. Les activités de R&D nécessaires pour atteindre cet objectif sont dotées d'un budget de 1,5 milliards d'euros sur la période 2020-2024, géré par la DGAC dans le cadre du Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile (CORAC) auquel l'ONERA participe.

Quel est le rôle d'un organisme de recherche comme l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales dans le cadre de ce plan de relance ? L'ONERA doit-il se transformer pour répondre à cet enjeu sociétal que

représente la réduction de l'empreinte environnementale ?

Avant de répondre à ces questions, rappelons quelques éléments importants du plan de relance décliné au sein du CORAC. Tout d'abord, seul un effort porté sur l'ensemble de la flotte permettra d'atteindre l'objectif global de réduction des émissions de l'aviation, même si un effort particulier doit être porté sur les avions commerciaux, qui constituent la majeure partie des flottes actuelles et contribuent à la plus grande partie des émissions. En revanche, il est indispensable d'adapter les solutions technologiques au type d'aéronef : par exemple, si le remplacement de la propulsion thermique par un système électrique peut être envisagée pour un petit hélicoptère ou un petit avion régional, il n'en n'est pas question pour un avion moyen-courrier pour des questions de densité énergétique des batteries en particulier. C'est donc un ensemble de solutions technologiques que le CORAC a décliné dans ses feuilles de route, chacune adaptée à l'aéronef concerné. À titre d'exemple, pour ce qui est de l'avion moyen-courrier successeur de l'A320 Neo, deux axes de R&D à mener en parallèle ont été identifiés : 1) Atteindre une ultra sobriété énergétique (gain de 30% en consommation) au moyen de moteurs à très haut taux de dilution (UHBR) ainsi que l'introduction de 100% de carburants de synthèse durables (biocarburants ou électro-carburants) ; 2) L'avion avec l'hydrogène comme combustible primaire. Notons par ailleurs que les objectifs fixés nécessitent l'entrée en service de ce futur avion vert en 2035 : il faut donc faire très vite, ce qui va nécessiter une forte adaptation des outils et méthodologies de conception des avions.

Le plan de relance aéronautique appelle finalement une double révolution : révolution technologique d'une part pour concevoir les aéronefs verts de demain et révolution méthodologique d'autre part pour se donner les moyens d'une transition écologique plus rapide et plus efficace.

## LA RECHERCHE MENÉE À L'ONERA, TERREAU DES RÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

La feuille de route scientifique et technologique de l'ONERA parue en 2019 décline la stratégie du domaine aéronautique en trois axes forts :

**Axe 1** : Nouvelles générations d'aéronefs pour le

transport civil, qui détaille le plan de recherche de l'office dans les domaines de la propulsion électrique, de la mobilité à la demande, de l'autonomie et de la connectivité.

**Axe 2 :** Réduction de l'empreinte environnementale du transport aérien, comprenant les recherches relatives à la réduction de la consommation, des émissions polluantes et du bruit.

**Axe 3 :** Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien, recherches visant d'une part à se doter des moyens de preuves de conformité à des règles jugées nécessaires pour assurer la sécurité, et d'autre part à contribuer à l'évolution de ces mêmes règles pour les rendre plus précises, efficaces, faciles à mettre en œuvre.

On peut noter à ce stade que le plan de relance aéronautique ne modifie pas ces grands axes stratégiques : si le programme ONERA de l'année 2020 comprenait approximativement 40% des recherches déjà liées – de près ou de loin – à la thématique environnementale, le plan de relance nous donne l'opportunité de le renforcer en accélérant les recherches menées dans les axes 1 et surtout 2.

Décarboner le transport aérien, c'est avant tout décarboner le combustible utilisé dans les moteurs, constitué à l'heure actuelle en majeure partie de kérosène et source des émissions de CO<sub>2</sub>. Le plan à moyen terme de l'ONERA dans ce domaine s'articule autour des carburants de synthèse durables (CSD : biocarburants ou électro-carburants), de l'hydrogène sous forme cryogénique et de la propulsion électrique et hybride. La production des carburants de synthèse fait appel à des processus complexes et coûteux en énergie (par exemple : électrolyse de l'eau, captation de CO<sub>2</sub>, procédé Fischer-Tropsch). L'ensemble de la chaîne est-il viable économiquement ? Quel est son bilan carbone global ? Répondre à ces questions est l'objet du projet ENERGIA financé par la DGAC coordonné par l'ONERA et qui aborde tous les nouveaux carburants envisagés : biocarburants, électro-carburants, hydrogène.

L'expérience de l'ONERA dans le domaine des carburants de synthèse durables réside dans la caractérisation de leurs propriétés physico-chimiques afin d'assurer leur compatibilité avec une utilisation à 100% sans modification des avions actuels. Rappelons qu'aujourd'hui le taux d'incorporation maximal autorisé des carburants de synthèse est de 50%. L'objet des études et recherches est à terme d'apporter des réponses aux besoins des motoristes pour la certification. La principale

différence entre les carburants de synthèse et le kérosène est l'absence d'aromatiques. Leurs propriétés comme la densité, la viscosité, leurs conditions d'inflammabilité sont différentes et il est donc essentiel de conduire des études pour les caractériser dans la gamme complète de températures et pressions rencontrées en vol. L'étude des conditions de cokéfaction des carburants, l'optimisation des conditions d'injection des carburants, le rallumage en altitude, la caractérisation des émissions en sortie de chambre sont autant de thématiques à aborder, faisant appel à des moyens expérimentaux très spécifiques et à des techniques de mesures extrêmement pointues bien maîtrisées par les équipes de l'ONERA (bancs M1 et MICADO en Ile de France pour les essais d'injecteurs et de secteur de chambre, bancs Mercato et LACOM en Occitanie pour les essais d'allumage et d'atomisation). La combinaison calcul-expérience sera en outre un élément important pour se doter de capacités de prédiction du comportement de ces nouveaux combustibles à partir de leur composition. Des projets DGAC en cours de montage permettront de poursuivre les travaux initiés par l'ONERA et ses partenaires européens dans les projets Jetscreen ou Alternate.

L'engouement pour l'hydrogène, facteur considéré comme clef de la réussite de la transition énergétique, s'est concrétisé en septembre 2020 par l'annonce d'un plan national de déploiement de l'hydrogène vert qui devrait assurer à terme la production de cette source d'énergie de manière décarbonée en quantité suffisante pour l'ensemble des besoins nationaux, en particulier ceux de l'industrie aéronautique. L'ONERA focalise ses travaux sur l'utilisation de l'hydrogène comme combustible pour les moteurs. Les avantages de l'hydrogène comme combustible sont nombreux : disponibilité de la ressource (production à partir de l'électrolyse de l'eau ou de l'oxydation de la biomasse), faible densité massique (qui permettrait une réduction de la masse de carburant à embarquer d'un facteur de l'ordre de 2,8, à iso mission), bilan carbone extrêmement faible (rejet de vapeur d'eau en sortie moteur). Il présente un certain nombre d'inconvénients dont le principal est sa très faible densité énergétique volumique qui implique une utilisation sous forme d'un liquide cryogénique (-252,85°C). Cela entraîne de multiples défis à surmonter, le premier étant celui de la conception d'un avion avec des réservoirs 4 fois plus volumineux que les réservoirs de kérosène donc plus difficiles à loger. Ces contraintes d'encombrement nécessitent de revoir les configurations avions, thème sur lequel les équipes pluridisciplinaires de l'ONERA possèdent de nombreux atouts. Par

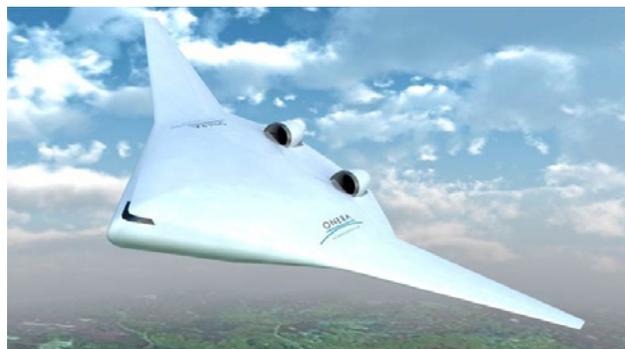


Crédit : Philippe Choy (ONERA)

Concept d'avion de transport à hydrogène

exemple, la configuration d'aile volante, déjà étudiée par l'ONERA dans son projet de recherche CICA V (Conception Intégrée d'une Configuration d'Aile Volante), pourrait être une alternative très intéressante aux configurations tube & wings pour un futur avion à hydrogène. Le stockage cryogénique appelle de nouvelles recherches sur les matériaux constitutifs des réservoirs, ces derniers devant combiner légèreté, tenue aux contraintes thermomécaniques (accentuée dans le cas de réservoirs structuraux), résistance aux impacts et durée de vie compatibles avec une utilisation aéronautique ; thèmes sur lesquels l'ONERA possède de solides compétences. Il pourra également être intéressant de lancer des études plus prospectives sur des solutions de stockage chimique sous forme solide, ou encore de participer à l'élaboration des matériaux utilisés dans les piles à combustibles, dans les photocatalyseurs. Les contraintes sévères de fonctionnement des éléments constitutifs du circuit carburant nécessiteront également des recherches pour assurer la compatibilité des matériaux utilisés avec la présence d'hydrogène depuis les réservoirs jusqu'à la chambre de combustion. Les aspects sécuritaires seront également à aborder (par exemple gestion des fuites éventuelles d'hydrogène dans les circuits) en regard des nouvelles normes de certification qui seront à adapter. L'architecture de ces chambres de combustion devra elle aussi être revue : forts de leurs compétences en simulation numérique des foyers aéronautiques et de ses moyens expérimentaux, les spécialistes de l'ONERA sont pleinement impliqués dans la préparation de nouveaux projets dans le cadre du CORAC pour étudier les problématiques d'injection, d'allumage, de combustion.

L'expérience des équipes ONERA dans l'utilisation de l'hydrogène comme combustible des moteurs fusée est un atout précieux pour aborder son utilisation pour l'aéronautique civile, usage qui nécessitera des investissements dans l'adaptation des moyens expérimentaux pour les rendre compatibles avec l'utilisation de carburants cryogéniques.



Aile volante (projet CICA V)

L'énergie électrique – stockée ou produite en vol – est une autre voie de décarbonation de l'aviation. Le champ d'investigation est immense et la propulsion électrique ou hybride électrique – thermique ne peut être envisagée que pour un certain type d'aéronefs. La densité énergétique des batteries (rapport énergie stockée/masse) actuelle, ou pour la décennie à venir, ne permet en effet pas d'envisager le successeur d'un Airbus A320 tout électrique mais peut permettre en revanche une transition du secteur de l'aviation générale voire régionale vers une aviation électrique, les solutions hybrides étant plus réalistes pour des appareils plus gros avec des

puissances de plus d'une dizaine de mégawatts. Dès 2017, l'ONERA travaillait sur le projet AMPERE (<https://www.youtube.com/watch?v=acLxVkJ13E>), un démonstrateur d'avion régional 4-6 passagers à propulsion électrique distribuée. Le projet a permis l'acquisition d'une base de données expérimentales importante et la montée en compétences des équipes dans la maîtrise des problèmes liés à une architecture de propulsion électrique.

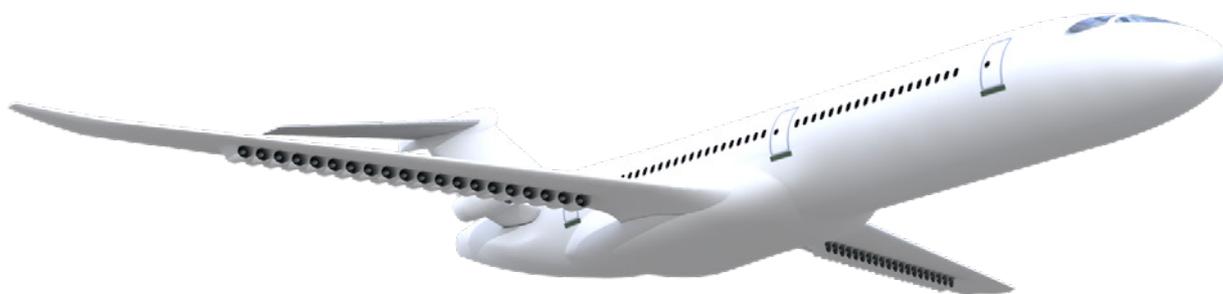


*Avion à propulsion électrique (projet AMPERE)*

Plus récemment, l'ONERA présentait au salon du Bourget 2019 son concept d'avion DRAGON pour le segment SMR (Short Medium Range) (<https://www.onera.fr/fr/actualites/comment-reduire-la-consommation-de-carburant-dragon>), dont le but est d'évaluer les avantages et inconvénients de la propulsion hybride distribuée pour un avion de ligne. Ce même projet est celui qui avait été retenu par la Cleansky JU (Joint Undertaking) pour son propre stand. Par ailleurs, en janvier 2020, la Commission européenne a sélectionné dans le cadre d'Horizon 2020 le projet d'étude de la propulsion hybride électrique IMOTHEP (<https://www.onera.fr/fr/presse/projet-propulsion-hybride-electrique-imothep>

dirige-par-onera) coordonné par l'ONERA. Ce projet composé d'un consortium de trente-trois acteurs clés de l'industrie aéronautique et de la recherche conduira une étude approfondie des technologies électriques pour la propulsion hybride électrique des avions commerciaux, en relation étroite avec la conception de configurations innovantes développant de nouvelles synergies entre cellule et propulsion. Une problématique commune à tous ces projets est la maîtrise des risques liés à la multiplication des câblages nécessaires au transport de courant de forte puissance à des tensions qui pourraient aller jusqu'à un millier de volts ou au-delà : les phénomènes de compatibilité électromagnétique des composants dans l'avion, de courants induits, d'échauffement dans les câbles ou encore de détection / prévention des décharges et arcs électriques sur les faisceaux de câbles sont autant de domaines de recherche que les équipes de l'ONERA étudient dans une approche pluridisciplinaire, au moyen de conventions de recherche financées par la DGAC.

En outre, quel que soit le carburant utilisé, la réduction de la consommation reste une préoccupation majeure. L'ONERA possède toutes les compétences pour continuer à progresser sur le terrain de la sobriété énergétique des aéronefs, en s'appuyant notamment sur des moyens d'essais uniques comme les souffleries indispensables pour l'étude de configurations en rupture. Sans être exhaustif sur les leviers historiques et toujours d'actualité que sont la réduction de traînée, la réduction de la masse et l'amélioration de l'efficacité des moteurs, le plan de relance devra permettre de dynamiser les voies de recherche suivantes :



*Concept d'avion à propulsion hybride distribuée (Dragon)*

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

### LE PLAN DE RELANCE AÉRONAUTIQUE À L'ONERA



NOVA : exemple d'installation motrice semi-enterrée

a) **Les moteurs à très haut taux de dilution** : l'ONERA a toujours accompagné le motoriste Safran dans l'augmentation continue du taux de dilution de ses moteurs, grâce à ses compétences en aérodynamique (simulation numérique en particulier), acoustique et mécanique des structures. Il est possible d'augmenter encore le taux de dilution (By-Pass Ratio ou BPR) du moteur Leap par exemple et viser des BPR de l'ordre de 13 en étant particulièrement attentif à la maîtrise de la tenue mécanique des aubes de fan ou encore à la robustesse des performances aux hétérogénéités de l'écoulement amont (vent de travers). Au-delà d'un BPR de l'ordre de 15, un consensus semble indiquer que la meilleure solution n'est plus le turbofan (à cause de contraintes de masse) et qu'un ensemble propulsif sans carène est plus attractif. Sur ce sujet, l'ONERA a été pleinement impliqué avec Safran et Airbus dans tous les projets, notamment européens, destinés à maturer la solution dite CROR (Counter Rotating Open Rotor) basée sur des doublets d'hélices contrarotatives. Une alternative intéressante semble émerger, celle de l'USF (Unducted Single Fan), qui consiste en un CROR dont l'hélice arrière est remplacée par un gros redresseur. L'ONERA a initié les études du concept USF dans le projet ADEC du partenariat européen Clean Sky 2. Cette première expérience combinée à nos compétences historiques sur les turbofans, les CROR et les hélices rapides dans les domaines de l'aérodynamique, l'acoustique, l'aéroélasticité devra permettre la montée en maturité de cette technologie qui constitue une des voies prometteuses pour le successeur de l'A320.

b) **Une intégration motrice optimisée** : l'ONERA a analysé dès 2008 des configurations d'intégration motrice innovantes avec le projet NOVA (<https://www.onera.fr/fr/actualites/nova-pour-une-aeronautique-plus-verte>), dont la nouveauté était de penser la cellule avion et le moteur simultanément. En partant d'un moyen-courrier, l'idée était de positionner les moteurs à l'arrière de façon semi-enterrée. Cette intégration partielle permet d'ingérer la couche limite du fuselage et de réduire ainsi la puissance nécessaire, et donc la consommation pour un meilleur bilan aéropulsif. Dans la même logique,

le projet E2IM « Étude de concepts innovants pour l'intégration motrice » (<https://www.onera.fr/fr/actualites/nouvelles-formes-avions-pour-preparer-la-transition-energetique>) imaginait également un positionnement différent des moteurs par rapport au reste de la structure. Ces recherches se sont poursuivies récemment avec Airbus pour aboutir à la configuration NAUTILIUS, présentée au Salon du Bourget 2019, configuration qui permet de maximiser l'ingestion de couche limite grâce à un positionnement adapté des moteurs à l'arrière du fuselage. Si les principes de base de l'ingestion de couche limite (ou BLI en anglais) sont connus, son utilisation pour un nouvel avion de transport pose de nombreuses questions abordées dans la convention de recherche SUBLIME menée par l'ONERA avec un financement de la DGAC : quel est le gain aéropulsif que peut apporter la BLI en régime transsonique (vol de croisière à Mach 0,8) ? Quel est l'impact des distorsions amont engendrées par la BLI sur la stabilité aéroélastique du fan, sur le rendement et l'opérabilité (marge au pompage) du moteur ? Nul doute que les essais en soufflerie prévus dans ce projet apporteront des éléments de réponse précieux à ces questions.

c) **La réduction de la traînée induite** : un moyen efficace de réduire la traînée dite induite d'un avion de transport – qui représente environ 35% de la traînée totale en croisière – est d'augmenter l'allongement des ailes (rapport envergure / corde moyenne). Les nouvelles technologies en termes de matériaux et structures (maîtrise des comportements non linéaires) ou encore des systèmes de contrôle (actifs, pour s'adapter aux conditions de vol) offrent de réelles possibilités pour arriver à un très bon contrôle de la stabilité aéroélastique d'ailes dont l'allongement pourrait dépasser 12 (contre 9,5 sur un A320 actuel). L'ONERA a poursuivi les recherches sur ce thème au cours des dernières années avec le projet de recherche interne ALBATROS (avion avec ailes haubanées) et est un partenaire d'Airbus dans le projet du plan de relance MAJESTIC dont le démarrage est prévu en 2021.

L'ONERA est aujourd'hui à la pointe des recherches dans le domaine de l'acoustique, répondant ainsi à une demande sociétale toujours croissante de réduction des émissions sonores. Les résultats sont d'ailleurs au rendez-vous : réduction d'un facteur 4 du bruit perçu émis par un avion de transport en 40 ans (réduction de 50% du bruit pour le H160 d'Airbus Helicopter grâce à une pale disruptive conçue avec l'ONERA) ! L'introduction des nouvelles technologies de propulsion mentionnées

ci-dessus conduira inévitablement à des recherches spécifiques pour combiner la réduction des émissions polluantes et celle des émissions sonores. Voici quelques pistes de recherche particulièrement motivantes pour nos spécialistes :

- La recherche de nouvelles technologies de liners acoustiques, adaptées d'une part aux nouvelles caractéristiques en termes de fréquence des émissions sonores issues des moteurs et d'autre part aux nouvelles contraintes d'encombrement engendrées par la réduction de la longueur des nacelles et donc des entrées d'air. Les acousticiens de l'ONERA sont particulièrement imaginatifs dans ce domaine et ont par exemple déjà fait des démonstrations éloquentes de liners dits Leonar (en forme de spaghetti) ;
- La multiplicité des ensembles propulsifs (hélices ou fans) rendue possible par la propulsion électrique ou hybride et amène à se poser la question de la modification des sources de bruit sous l'effet des interactions aérodynamiques entre les sillages des pales ou purement acoustiques. La maîtrise du bruit rayonné par les configurations à propulsion distribuée est un défi que les équipes de l'ONERA ont à cœur de relever dans la décennie à venir.
- Citons enfin la problématique du bruit rayonné par les nouveaux usages que constituent par exemple les drones ou encore les nouvelles solutions de mobilité aérienne en environnement urbain : un ensemble de connaissances spécifiques est à constituer tant sur les sources de bruit que sur leur propagation en environnement urbain et leur perception par les populations. Des projets ont déjà été lancés sur ce sujet dans le cadre par exemple du Conseil des drones civils (pré-étude Mosquito) et devront être poursuivis.

### L'ONERA ACTEUR DES RÉVOLUTIONS MÉTHODOLOGIQUES

L'introduction des nouvelles technologies nécessaires pour l'émergence d'une aviation verte rend indispensable la maîtrise de nouvelles disciplines qui n'étaient jusqu'à présent pas indispensables pour la conception d'un avion (électrotechnique pour la propulsion électrique ou hybride par exemple). Dans ce contexte pluridisciplinaire, il devient incontournable de faire dialoguer des outils de conception abritant des modélisations de niveaux de fidélité variés : basse fidélité (modèles analytiques par exemple), moyenne fidélité (méthodes de poutre pour la mécanique ou méthodes tourbillonnaires pour l'aérodynamique) ou haute-fidélité (CFD pour la mécanique des fluides). L'ONERA est particulièrement actif sur les

méthodologies de construction de modèles basse fidélité à partir de modèles haute-fidélité et de dialogue/enrichissement de la modélisation dans une approche multi-fidélité. Par ailleurs, la construction de modèles aussi représentatifs de la réalité que possible est un domaine en pleine mutation, les modèles pouvant être alimentés par des données de natures très variées : résultats de simulations basées sur des équations représentatives de la physique, résultats d'expérimentations dédiées, retour d'expérience avec paramètres incertains, utilisation de bases de données, etc. La maîtrise de techniques, basées en particulier sur l'intelligence artificielle, est un secteur clef de transformation de la simulation numérique, qui a conduit à la création en 2019 d'un laboratoire de mathématiques appliquées ou encore du centre de recherche virtuel ONERA-DLR « *Artificial Intelligence in Aerospace Engineering* » en 2020.

L'objectif très ambitieux du plan de relance (nouvel avion dans 15 ans) nécessite une réduction du temps des cycles de développement des produits à tous les niveaux. L'ONERA intervient traditionnellement dans les phases amont de ce cycle, mais une voie importante d'accélération est la prise en compte aussi tôt que possible du mode de fabrication des composants (sous-structures, structures, systèmes) : c'est le domaine de la co-conception qui vise à obtenir le meilleur produit fabricable possible, c'est-à-dire tenant compte du système de production. L'ONERA contribue par exemple au projet DGAC EXCELAB avec Airbus qui doit démarrer en 2021 pour apporter son expertise sur des techniques d'intelligence artificielle (optimisation discrète et ordonnancement sous contraintes par exemple). Le plan de relance devra également donner les moyens de revoir de fond en comble l'architecture logicielle des grands ensembles de simulation numérique pour les adapter aux caractéristiques des nouvelles architectures des calculateurs. Des actions spécifiques dans les domaines de la mécanique des fluides (logiciel SoNICS successeur d'elsA) ou encore de la mécanique des structures (logiciel ARIZE successeur de Zset) ont été proposées, tirant profit de compétences ONERA à la pointe du domaine (par exemple en génération automatique de code). Elles permettent raisonnablement d'espérer des gains d'un facteur supérieur à 10 dans les temps de restitution des calculs à un horizon de 5 ans. Là encore, l'ONERA apparaît comme incontournable pour mener ces actions de transformation des codes indispensables à la réalisation des ruptures technologiques envisagées au niveau des aéronefs.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

### LE PLAN DE RELANCE AÉRONAUTIQUE À L'ONERA

Tout ceci permettra de concrétiser la notion de jumeau numérique, d'apporter une aide précieuse à la certification, sources d'économies énormes en termes de temps de mise en service des produits.

#### COMPRENDRE L'IMPACT CLIMATIQUE DE L'AVIATION

Les options technologiques évoquées jusqu'à présent poursuivent l'objectif de décarbonation de l'aviation civile visé par le plan de relance. Cet objectif est nécessaire mais gardons à l'esprit le but ultime qui demeure celui des accords de la COP21, à savoir la limitation du réchauffement climatique en-dessous de 2°C. Les technologies de décarbonation vont mécaniquement avoir un effet bénéfique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, notamment le CO<sub>2</sub>. Mais de nombreux autres facteurs entrent en ligne de compte dans le forçage radiatif via des mécanismes chimiques et microphysiques complexes : c'est le cas des traînées de condensation émises par les avions de transport à haute altitude. Les études actuelles indiquent que l'impact radiatif des traînées de condensation et des cirrus induits est potentiellement comparable, voire supérieur à celui du CO<sub>2</sub>. Mais le plus remarquable est qu'il existe une énorme incertitude sur l'effet réel de ces traînées sur le réchauffement climatique, incertitude pouvant aller jusqu'à 70% (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689?via%3Dihub>) ! Il est donc indispensable de mieux comprendre les phénomènes physiques très complexes liés à la formation des traînées de condensation afin d'être en mesure de tenir compte de leur impact réel dans le choix des technologies à développer.

En particulier, un enjeu considérable est de comprendre l'influence de la combustion des carburants alternatifs de synthèse et celle de l'hydrogène sur la formation et les propriétés des traînées de condensation et d'en dégager des tendances sur le forçage radiatif, par comparaison avec ce qui est observé pour des traînées issues d'une combustion de kérosène. Est-ce le rôle de l'ONERA ? La réponse est oui, même si le cœur de métier de l'ONERA

a toujours été celui du champ proche autour de l'avion (aérodynamique, combustion). La physique de l'atmosphère et du climat faisant appel à des disciplines non maîtrisées par l'office, le challenge est donc de bâtir en coopération avec les spécialistes du climat un ensemble de compétences et méthodes permettant de comprendre la totalité de la chaîne. Celle-ci s'étend depuis les petites structures spatiales et temporelles à quelques envergures derrière l'avion jusqu'aux grandes échelles spatio-temporelles caractéristiques du climat. C'est en poursuivant cet objectif et dans cet esprit que sont en train de se construire de nombreux projets soutenus par la DGAC.

Au final, cette meilleure compréhension des effets indirects de l'aviation sur le climat pourra aboutir au concept de trajectoires vertes pour les vols, thème sur lequel l'ONERA ambitionne également d'être présent, fort de ses compétences développées dans les partenariats européens Clean Sky, Sesar et Sesar2020.

#### CONCLUSIONS

Pour conclure, le plan de relance aéronautique doit apporter à l'ONERA les moyens financiers et humains de la poursuite de son implication dans la préparation de l'aviation verte à l'horizon 2035. Les deux évolutions les plus importantes que l'on peut anticiper concernent d'une part la modernisation des moyens en combustion et métrologie associée, d'autre part un renforcement des moyens dédiés à l'étude de l'impact climatique de l'aviation, en coopération avec les laboratoires spécialistes du sujet.

La filière aéronautique peut compter sur l'ONERA pour continuer l'adaptation de son socle de connaissances afin de répondre au challenge sociétal de la réduction de l'empreinte environnementale de l'aviation civile, tout en s'assurant du très haut niveau de sécurité des solutions à déployer. ■

# De l'art délicat de qualifier l'hydrogène sur les avions de demain

par Daniel Gaffié, ingénieur expert chargé de mission propulsion aéronautique au département multi-physique pour l'énergétique de l'ONERA

## *Dans l'ancien monde ...*

*Dans l'ancien monde – qui prit fin il y a à peu près six mois – la pression écologique pesait déjà fortement sur un secteur aéronautique civil international alors en pleine expansion, pointé du doigt comme le mauvais élève tardant à faire sa mue vers un monde idéal où les émissions de CO<sub>2</sub> qui lui incombent, seraient réduites à peau de chagrin.*

Vu de l'intérieur – du côté des acteurs parties prenantes du domaine – cela pouvait apparaître comme relativement injuste, en regard des 75% de réduction de la consommation spécifique de carburant acquis, à grand renfort d'innovations technologiques, depuis le premier choc pétrolier, et d'une réduction concomitante, dans les mêmes proportions, des émissions des gaz à effet de serre (GES) : CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O, fatales émanations dues à la combustion aérobie du carburant aéronautique, hydrocarbure lourd (kérosène Jet A-1).

La réduction de l'impact environnemental de l'aviation civile ne s'arrêtait d'ailleurs pas là, car parallèlement au gain vertigineux de consommation de carburant obtenu, les émissions des polluants minoritaires furent également drastiquement réduites conformément aux exigences d'une réglementation internationale OACI, qui n'en finissait pas de se durcir au fil des années, des objectifs européens ambitieux de l'ACARE (Horizon 2020, Flightpath 2050), aussi.

Ainsi, la qualité de l'air dans l'environnement aéroportuaire (cycle LTO), s'améliorait continuellement via la maîtrise, à tout régime moteur, des polluants primaires émis : monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés, oxydes d'azote et particules fines. En conditions de haute altitude, les émissions polluantes – bien que moins quantifiées – furent également fortement réduites au fil du temps.

On pouvait donc raisonnablement penser que ce secteur qui demeure très dépendant du pétrole – représentant moins de 8 % de la consommation finale de pétrole dans le monde comparativement au transport routier (véhicules légers et fret) qui en consomme encore sensiblement 50 % – avait donc contribué à réduire honnêtement son impact environnemental.

Gardons à l'esprit que, quand l'ancien monde s'acheva, nous en étions, pour un A320, à une consommation moyenne de l'ordre de 2,5 litres par centaine de PKT (Passagers Kilomètres Transportés), étonné de constater que, l'empreinte carbone du passager d'un A320 effectuant son trajet avec un taux d'occupation maximum était sensiblement identique à celle du passager d'une voiture de moyenne gamme, équipée d'un moteur thermique standard, effectuant une distance similaire, à moitié de sa capacité passager. Pas si mal, d'autant que nous pouvions encore espérer quelques gains de performance substantiels dans le cadre d'approches, plus ou moins conservatrices, qui conduiraient inéluctablement à l'amélioration de nos systèmes actuels (avion, système propulsif, gestion du trafic aérien), parfaitement identifiée et balisée dans les feuilles de route, d'alors.

Pour ce qui est du carburant aéronautique, jusqu'en juillet 1999, date à laquelle l'autorisation d'emploi d'un carburant constitué d'hydrocarbures de synthèse issus du charbon (via le procédé Fischer-Tropsch) fut accordée à la société SASOL, l'innovation technologique aéronautique, en termes de gain de performances, s'exerçait relativement indépendamment d'un carburant aéronautique Jet A-1 « boîte noire ». L'intérêt suscité par les perspectives offertes de production d'hydrocarbures liquides à partir de ressources non conventionnelles, dont la biomasse, se traduisit par le lancement de projets de recherche, nationaux, européens, centrés sur le comportement de ces nouveaux carburants. Sur le plan d'une innovation technologique au bénéfice de la réduction de l'impact environnemental de l'aviation civile, le carburant venait constituer un levier de progrès certain.

Ainsi, on s'intéressa d'abord aux problématiques de stockage et de transfert relevant du circuit carburant des avions ; comportement à froid (impact des basses

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES DE L'ART DÉLICAT DE QUALIFIER L'HYDROGÈNE SUR LES AÉRONEFS DE DEMAIN

températures sur la résistance à l'avancement et la présence potentielle de cristaux de glace), comportement à chaud (stabilité thermo-oxydative, craquage, cokéfaction). Accompagnée par le durcissement annoncé de la réglementation vis-à-vis des émissions de particules fines – non volatile Particulate Matter (nvPM) – la question cruciale de l'impact de la composition chimique du carburant (hydrocarbure liquide multi-constituant) sur son comportement au sein de la chambre de combustion et du contrôle des émissions polluantes produites, fut, ces dernières années, largement étudiée. La disponibilité à moyen-terme du pétrole, la certification de nouvelles filières de production de carburants synthétiques sont autant de raisons qui militaient pour une entrée plus tardive de l'hydrogène dans le monde aéronautique. Ainsi, une évolution continue – qui ferait passer du fossile, au synthétique (drop-in), puis, à moyen-terme, aux hydrocarbures plus légers (ouvrant à la problématique ardue de leur forme embarquée) semblait vouloir s'installer.

Hors la survenue d'une peu probable révolution scientifique et technologique, l'hydrogène – du fait de son fort potentiel – finirait par s'imposer, certainement dans un contexte de pénurie amenant à revoir les équilibres traditionnels. Intuitivement, on pouvait imaginer – pour des raisons techniques et d'acceptabilité environnementale – la propulsion par des hélices rapides, plus économes en énergie à Mach de vol plus faible (typiquement 0,6 à 0,7) venir supplanter une propulsion par turboréacteurs.

### *Dans le nouveau monde ...*

*Trois mois plus tard, dans le monde d'après – à l'épreuve de la COVID-19 chamboule-tout qui marque toujours notre quotidien – l'aviation civile internationale, jusqu'alors en pleine expansion, se réveille groggy, durablement affectée ; observateur impuissant de perspectives de croissance brutalement annihilées. La recherche d'un indispensable nouvel équilibre, écologiquement soutenable, acceptable sur les plans économique et sociétal, ouvre aujourd'hui la voie de la décarbonation du transport aérien. Au bout du bout de la liste des énergies nouvelles susceptibles de répondre à cet objectif ambitieux, l'hydrogène, renversant l'ordre précédemment établi, s'impose comme l'alternative crédible au carburant aéronautique actuel. De fait, il fait aujourd'hui l'objet de toutes les attentions. Quels sont ses avantages, ses inconvénients ? Telle est la question qui se pose.*

Sur le papier, l'hydrogène – pour peu que l'on sache le maîtriser sur le large domaine de fonctionnement requis pour un aéronef (c'est-à-dire du ralenti au plein gaz) – fait incontestablement le job. Son potentiel énergétique est fortement avantageux. Sur le plan environnemental, il permet d'écarter bon nombre d'émissions primaires, CO<sub>2</sub> et non-CO<sub>2</sub> ; monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures imbrûlés (HC) et particules fines, même si la question des émissions d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et de la vapeur d'eau (GES), demeure. L'hydrogène se pose donc en alternative alléchante pour les applications aéronautiques, dès lors qu'il est lui-même produit avec une énergie verte. Néanmoins, sa très faible masse volumique associée à la très basse température de sa liquéfaction, rend son stockage à bord techniquement plus difficile, et plus coûteux, que celui des autres gaz. En regard des quantités de combustible requises, qui se comptent en tonnes, un stockage autre que sous forme liquéfiée, n'apparaît, de fait, pas acceptable.

Sur ces capacités énergétique d'abord, l'observation du Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) – qui mesure la quantité de chaleur dégagée à la stœchiométrie par la combustion complète d'un kilogramme de combustible – est incontestablement à l'avantage de l'hydrogène. Elle est près de 3 fois supérieure à celle du Jet A-1. En revanche, la différence de masse volumique de l'hydrogène liquéfié (~ 70 kg/m<sup>3</sup> sous 1 bar à 20 K) comparativement à celle du Jet A-1 (780 à 800 kg/m<sup>3</sup>), induit un volume d'hydrogène liquéfié embarqué 4 à 5 fois supérieur comparativement à celui du Jet A-1. À cet encombrement « combustible », s'ajoute celui des réservoirs de stockage cryogénique, équipés des structures isolantes nécessaires au maintien de l'hydrogène liquide à une température inférieure à -250°C, sans compter les divers éléments constitutifs du système regroupant les fonctions de gestion et de répartition de l'énergie à bord, de transfert de l'hydrogène jusqu'à la chambre de combustion (pompes, échangeurs de vaporisation, etc.). Tout ceci contribue à l'alourdissement général de l'ensemble, évalué entre 4 et 8 fois la masse de l'hydrogène embarqué. Ces considérations, portant sur le bilan de masse ou relevant d'une traînée aérodynamique externe potentiellement majorée, peut conduire à limiter la quantité d'hydrogène emportée. Tout ceci doit être scrupuleusement étudié en regard des profils de mission. C'est en cela que le stockage d'hydrogène constitue une préoccupation pour le développement de la technologie de « l'hydrogène aéronautique ».

Outre la question majeure de la propulsion, l'hydrogène peut aussi susciter un autre intérêt, celui de répondre au besoin de l'aéronef en énergie « non propulsive », permettant d'assurer le fonctionnement de certaines de ses fonctions (démarrage des moteurs, actionneurs des commandes de vol, ventilation, éclairage, etc.). Actuellement, celle-ci est fournie par les systèmes APU – groupe auxiliaire de puissance – fonctionnant au kérosène ou à l'électricité (batteries embarquées). La disponibilité d'hydrogène à bord, facilement accessible, pourrait s'avérer potentiellement intéressante en regard de l'installation de piles à combustible (dihydrogène-air) offrant ainsi une voie de grande fiabilité, alternative aux systèmes conventionnels : une solution à creuser, alimentant les réflexions sur une diversification des énergies à bord.

En ce qui concerne la turbomachine fonctionnant à l'hydrogène, le cycle thermodynamique « traditionnel » de Brayton-Joule – pour lequel la conversion de l'énergie s'effectue par combustion, à pression constante – serait, dans un premier temps, prudemment maintenue. À plus long terme, on pourrait être tenté de rechercher une optimisation du cycle via l'exploitation du potentiel de refroidissement de l'hydrogène liquide pour les parties chaudes tournantes, et ainsi réduire la fraction d'air classiquement affectée à cette fonction. À cette occasion, les fondamentaux de la turbomachine propulsive seraient revisités, conduisant ou pas à maintenir la tendance des taux de compression (OPR) toujours plus élevés. Les corps BP et HP des turbomachines seraient repensés, avec des retombées immédiates sur la taille du moteur et, par conséquent, sur sa masse, en fonction des missions type.

La conception d'une chambre de combustion alimentée à l'hydrogène, constituera, sans aucun doute, une préoccupation centrale, particulièrement son système d'injection. En effet, du système d'injection dépend grandement l'organisation de l'écoulement turbulent réactif dans le volume de la chambre de combustion, la stabilisation du processus de combustion, in fine le contrôle des émissions gazeuses qui en résultent, ceci pour tout régime de fonctionnement d'intérêt ; du cycle LTO au régime croisière de la haute altitude.

Dans le monde d'avant, il avait été montré le bénéfice d'une adjonction appropriée d'hydrogène au carburateur conventionnel, favorisant bien entendu les phases d'allumage, contribuant également à la stabilisation de la combustion, et à l'élargissement du domaine de stabilité de la chambre de combustion. Ce résultat, produit de la

recherche expérimentale, avait ainsi ouvert la voie d'une réflexion sur de potentielles technologies de rupture « Low-NOx » en mesure d'assurer un fonctionnement sécurisé du système d'injection loin de la stœchiométrie. Quid de ces observations dans la perspective du tout hydrogène comme seule source énergétique de l'aéronef ?

Il paraît fortement probable que la mise au point de systèmes d'injection à émissions réduites de NOx demeurerait extrêmement délicate, ceci pour plusieurs raisons. La première résulte d'une température de fin de combustion pour l'hydrogène sensiblement plus élevée que celle du Jet A-1 (supérieure à 100°C à iso richesse), plus facilement atteignable du fait de temps chimiques courts. Il s'ensuit une difficulté intrinsèque quant à la capacité de réduire le monoxyde d'azote (spécialement le NO thermique) dont la production est soutenue par les températures élevées. La seconde est inhérente à une vitesse de flamme laminaire, largement plus élevée pour l'hydrogène comparativement à celle du Jet A-1, accentuant vraisemblablement les difficultés d'installation d'un processus de combustion stable et la survenue potentielle de retours de flamme (flashback), dès lors que – pour des raisons liées au contrôle des NOx – les régimes de combustion turbulente pré-mélangés, voire partiellement pré-mélangés, seront recherchés.

On redoutera certainement une sensibilité de la combustion au régime d'injection de l'hydrogène dans la chambre, ainsi qu'à ses conditions thermodynamiques. Ce problème, redoutablement complexe, touche à l'analyse d'un comportement multi-fluide de l'hydrogène incluant le processus de changement de phase. Il devra être soigneusement étudié sur le plan numérique et les résultats obtenus corroborés par l'expérience. Le fait que, réactant et réactif puissent toutefois entrer gazeux dans la chambre de combustion (système d'injection aidant), constitue un avantage du point de vue de l'obtention rapide d'une bonne qualité du mélange des gaz réactifs frais, mais une préoccupation en termes d'opérabilité et de sécurité. Une conséquence est que l'on ne peut exclure l'apparition d'instabilités de combustion qu'elles que soient leur origine : instabilités du front de flamme inhérentes à la différence de masse volumique du mélange gazeux de part et d'autre du front de flamme, instabilités thermo-diffusives dues au fort gradient de température et aux effets conjugués contribuant au plissement et à l'étirement de la flamme propices à la survenue d'extinctions locales. À cela s'ajoute l'apparition, toujours possibles, d'éventuelles instabilités azimutales, dont le déclenchement au sein de foyer de

combustion annulaires, peut être lourde de conséquence sur sa tenue mécanique et ses performances.

Parallèlement, il serait nécessaire – en regard des conditions particulièrement hostiles rencontrées dans le tube à flamme – d'appréhender la durabilité de ces nouveaux concepts de foyers de combustion en considérant les problématiques liées au comportement aérothermomécanique des parties chaudes, y compris des aubes de turbines HP situées immédiatement en aval de la chambre de combustion : matériaux haute température à haute performance, barrières thermiques, technologies de refroidissement. Malgré tout, notons un certain avantage de l'hydrogène qui, comparativement au carburant conventionnel, induit des flux pariétaux plus faibles via l'abaissement de la composante radiative.

Un effort tout particulier serait mené sur la zone de dilution de la chambre à des fins d'homogénéisation des gaz brûlés et de la température, via le brassage turbulent induit par les jets de dilution. En effet, une préoccupation majeure demeurera la préservation de la durée de vie des aubes de turbines HP. Il faudra enfin se prémunir de phénomènes locaux de détonation qui pourraient impacter les performances de l'ensemble du système. Pour limiter la production du NO thermique, un raccourcissement de la chambre et de la zone de dilution constituera une piste sérieuse, pour peu que le rendement de combustion, ainsi que l'homogénéisation recherchée des gaz brûlés et de la température, en soient préservés.

Sur le plan environnemental, rappelons que les oxydes d'azote, spécialement NO et NO<sub>2</sub>, ont un effet reconnu préjudiciable sur la santé, le système respiratoire. Ils sont à l'origine de la formation de composés chimiques préjudiciables (tels les nitrosamines), qui perturbent la fonction respiratoire et affectent la résistance immunitaire.

Les NO<sub>x</sub> sont également impliqués dans la formation du « mauvais » ozone de basse atmosphère et la destruction du « bon » ozone stratosphérique protégeant la surface terrestre du rayonnement UV (dans la gamme 200-310 nm). Pour ce qui est de la destruction de l'ozone stratosphérique, l'Aéronautique paraît moins concernée par le problème. En revanche NO<sub>2</sub> et surtout N<sub>2</sub>O, entrent dans la catégorie des GES et contribuent de fait au réchauffement climatique, marginalement du fait de leur faible concentration.

Autre GES produit massivement et inéluctablement par la combustion de l'hydrogène, la vapeur d'eau H<sub>2</sub>O (~9 kg émis par kg de H<sub>2</sub> consommé) ; composé chimique un peu particulier auquel on ne peut attribuer un Potentiel de Réchauffement Global (PRG), du fait d'un temps de séjour limité dans l'atmosphère rendant impossible, compte tenu des cycles d'évaporation et de précipitation, un calcul précis de la teneur de vapeur d'eau dans l'atmosphère. À ce titre, notons avec intérêt que, d'une part, en rapport de leur puissance calorifique respective, la propulsion LH<sub>2</sub> conduit à émettre moins de GES que la propulsion conventionnelle Jet A-1, que, d'autre part, le pouvoir de réchauffement de la vapeur d'eau varie avec l'altitude (négligeable entre 0 et 9000 mètres, et croît rapidement au-delà). Il devrait s'ensuivre une réflexion portant sur l'optimisation de l'altitude de vol s'appuyant sur la recherche du meilleur compromis entre impact en termes de réchauffement climatique et consommation de combustible.

Les quantités de vapeur d'eau émises en régime de croisière, conduiront à étudier inéluctablement la problématique de la formation des traînées de condensation – également dépendante des conditions thermodynamiques et hygrométriques de la haute altitude – de leur persistance, de leur disparition par sublimation, de leur évolution en voile nuageux artificiels (cirrus induits), de leur contribution au réchauffement climatique par forçage radiatif.

Avec la combustion aérobie de l'hydrogène qui, contrairement à celle des hydrocarbures, ne produit pas de particules, des deux régimes de nucléation de vapeur d'eau identifiés – homogène (formation spontanée de cristaux de glace sans le recours d'une autre matière), hétérogène (nucléation de glace s'exerçant via des particules d'aérosols jouant le rôle de noyaux glaciogènes) – on imagine a priori que subsisterait, exclusivement et dans une moindre mesure, le processus de nucléation homogène. Ces considérations devront être toutefois vérifiées, cela est en effet sans compter le rôle possible de mécanismes de condensation et de nucléation directe inhérents aux vapeurs d'acide nitrique et d'ammoniac, sur la survenue de traînées de condensation et leur persistance.

Bien d'autres arguments en lien avec les aspects logistiques et économiques, qu'impose cette vraie révolution du passage à l'hydrogène pour le monde aéronautique, demeurent à discuter et leur criticité réelle précisément adressée. Au niveau aéroportuaire

par exemple, on estime que le temps de remplissage des réservoirs des aéronefs sera sensiblement plus long, mais les aspects sécuritaires devront être sérieusement renforcés (gardons à l'esprit que l'hydrogène n'est décidément pas un combustible comme les autres). Dans le même temps, on imagine que le déploiement de l'hydrogène sur les aéroports ne constituerait pas une difficulté insurmontable, au vu du nombre limité de plateformes.

Au-delà de toute question liée à la faisabilité technique, le succès de cette transition espérée vers une aviation civile décarbonée passe par l'expression d'un volontarisme général, unanimement exprimé sur le plan mondial, mais également de notre capacité à produire de l'hydrogène en quantité sur la base d'énergie propre, mais tout ceci dépasse largement le cadre de ce papier.

### Conclusion et perspective

*Il n'y a pas de doute à avoir sur l'issue de l'aventure technologique qui s'engage. Malgré les difficultés à lever, dont certaines ont été ci-dessus évoquées (elles ne sont d'ailleurs à ce jour pas toutes identifiées), la démonstration sera faite que l'hydrogène peut s'imposer comme le combustible du futur et constituer la rupture technologique majeure pour le secteur aéronautique du 21<sup>e</sup> siècle, pour peu que l'on puisse produire ce combustible en quantité suffisante et de manière décarbonée (hydrogène vert). La situation se présente aujourd'hui sous les meilleurs auspices, la volonté politique est incontestablement là et les moyens affichés à hauteur des ambitions, portés par les différents plans de relance de la filière, nationaux et européens.*

*En regard d'une contrainte temporelle forte, la question clé réside dans la capacité à disposer des nouvelles technologies, au moment voulu. Pour ce faire, une condition nécessaire est de solliciter efficacement, dans ces domaines de compétences respectifs, l'ensemble des forces vives ; des instituts académiques aux industriels du domaine aéronautique (voire spatial), en passant par les organismes de recherche et centre d'essais disposant de moyens expérimentaux aptes à évaluer les nouvelles technologies en conditions simulées représentatives du fonctionnement réel d'un aéronef. Dans ce cadre, on pense bien entendu à l'ONERA et à la DGA Essais Propulseurs.*

*Une montée rapide en TRL demeurant toujours problématique, il s'agira de favoriser une orientation efficace de travaux de recherche amont par une spécification technique claire et précise du besoin émanant du secteur applicatif. En retour les résultats les plus prometteurs issus de la Recherche, devront être rapidement confrontés à « la vraie vie », afin de statuer sur leur réelle potentialité. Le maître mot sera donc « agilité », une agilité qui devra s'appuyer sur les réseaux d'experts existants, nationaux et européens.*

*Dans ce contexte, l'ONERA – fort d'un savoir-faire acquis de longue date sur l'hydrogène pour les applications statoréacteurs – prépare ses moyens d'investigation en vue de prendre toute sa part à la stratégie R&D, qui se dessine aujourd'hui, ceci dans une gamme de TRL allant de 3 à 5 lui permettant d'assumer pleinement son rôle charnière entre la Recherche à caractère académique et l'Industrie. Les capacités des bancs d'essais sont ainsi réexaminées, de même que les moyens d'investigations métrologiques et numériques conformément aux nouveaux besoins induits par l'utilisation du nouveau combustible. À ce titre, si l'hydrogène apporte indéniablement son lot de complexités diverses, sa simplicité moléculaire offre aussi certaines facilités dont il faut savoir profiter en vue de l'amélioration de la qualité de la mesure et de la capacité de prédiction des outils de simulation.*

*Il est rassurant de constater que la nouvelle donne, imposée par le passage à l'hydrogène « aéronautique », ne modifie pas fondamentalement les feuilles de route de l'ONERA, même si elle conduit à revoir sensiblement les priorités. À l'aune des nouvelles technologies d'apprentissage automatique (machine learning) et de l'exploitation des données massives (big data) susceptibles de transformer radicalement nos méthodes de travail, améliorant notre savoir-faire et notre créativité, les approches conventionnelles relevant de l'Aérodynamique et de l'Energétique, sont ainsi rééclairées. L'intérêt se porte aujourd'hui sur l'aide à la conception de systèmes à haute performance, appuyée par un échange accru d'informations, entre simulation numérique à haute-fidélité (multi-physique, multi-échelle) et expérimentation très instrumentée, au travers de techniques nouvelles d'optimisation et d'assimilation de données. ■*

# L'avion à hydrogène : ambition ou illusion ?

par Eric Dautriat, membre 3AF et vice-président de l'Académie de l'Air et de l'espace



*Eric Dautriat est ancien directeur des lanceurs du CNES et ancien directeur exécutif de Cleansky. Il tient à préciser que ses réflexions n'engagent que lui*

La contribution du transport aérien au réchauffement climatique, malgré l'existence déjà ancienne de programmes de R&T destinés à la réduire, a longtemps occupé une place modeste dans l'agenda stratégique des dirigeants politiques et opérateurs (au-delà des habituels « mots-clés » de la communication), comme dans les préoccupations du grand public. Les efforts permanents de compétitivité passant par la réduction progressive de la consommation de carburant semblaient suffire.

Or, depuis peu, voici cette contribution devenue un enjeu politique, à travers une « prise de conscience » de la part d'une partie de la population européenne, et notamment des jeunes ; souvent excessive, et qu'on peut juger disproportionnée. Le transport aérien se voit attribuer le rôle de figure de proue d'une croissance aveugle et sans borne, de symbole arrogant de la mondialisation, voire d'allégorie des inégalités sociales...

Sans se soumettre à ces outrances, il est en tous cas indispensable, pour le secteur aérien, de définir sérieusement les moyens de réduire très fortement son empreinte « carbone » dans les décennies qui viennent, d'autant plus que les analyses prospectives promettent un triplement du trafic d'ici 2050. Promettaient, du moins, car la crise du COVID vient remettre beaucoup de choses à plat – mais c'est un autre sujet, trop important et trop incertain encore pour l'aborder ici en quelques lignes.

Or les moyens de cette « forte réduction » ne sont pas légion, dès lors qu'on veut bien observer quelques règles de bon sens : se focaliser sur ce qui compte vraiment et non sur des détails pittoresques ; considérer l'ensemble des besoins à une échéance donnée au lieu de raisonner « en silo » pour un secteur particulier ; pour une telle question planétaire (le transport aérien et l'effet de serre sont

tout aussi « mondialisés » l'un que l'autre !), n'accorder aucun crédit à une approche purement nationale si elle ne contient pas les moyens d'une stratégie mondiale ; et *last but not least*, se poser sans cesse la question des ordres de grandeur.

Ainsi, se focaliser sur ce qui compte vraiment, à savoir l'aviation commerciale (court-moyen courrier et plus encore, long-courrier) permet d'éviter de se laisser hypnotiser par les solutions attirantes mais marginales que représentent pour longtemps les avions à batteries ou à piles à combustibles, qui ne sont pas près de « jouer dans la cour des grands » (avions).

## QUELLES SOURCES D'ÉNERGIE POUR L'AVION DE DEMAIN ?

Les concepteurs disposent encore aujourd'hui d'un certain « panier » d'améliorations possibles de performance, qu'on peut qualifier d'incrémentales, qu'il faut certes encourager car elles seront nécessaires de toute façon ; mais chacun s'accorde à admettre que celles-ci (de l'ordre, au total, de 20 à 30% - la tendance de fond est asymptotique) resteront très insuffisantes pour apporter une réduction nette satisfaisante des émissions. Il est donc incontournable de considérer de nouveaux carburants. Les biocarburants aujourd'hui envisagés sont généralement fort critiquables si l'on considère leur cycle complet, leur effet total sur la planète, la concurrence avec d'autres cultures ; c'est un débat bien connu. Un long travail reste à faire, sous contraintes souvent contradictoires. Les déchets organiques ont leurs vertus, mais il est difficile d'imaginer une part importante la flotte mondiale volant grâce à ceux-ci. Les carburants de synthèse, « drop-in » c'est-à-dire pourvus à peu près des mêmes propriétés que le kérosène actuel, peuvent constituer une solution intéressante...

... Cependant ce n'est pas elle qui attire actuellement les suffrages, mais l'hydrogène. Carburant de synthèse lui aussi, mais « non-drop-in », c'est le moins qu'on puisse dire, car il nécessite un avion et des opérations radicalement différents. Pourquoi l'hydrogène ? En simplifiant, il présente deux atouts : d'une part, la possibilité au moins théorique d'un cycle totalement décarboné ; d'autre part, un pouvoir calorifique massique élevé, trois

fois supérieur à celui du kérosène (un PCI de 120 MJ/kg au lieu de 43). Voilà pour les avantages. Il est à craindre que toutes ses autres caractéristiques soient à ranger parmi les inconvénients ou au moins les difficultés, mais n'anticipons pas.

### UN ENGOUEMENT POLITIQUE

Un petit détour est nécessaire par les récentes annonces politiques, qui donnent à l'hydrogène, à vrai dire, un troisième atout (mais dangereux car il est par nature éphémère) : l'engouement médiatique. Celui-ci porte d'abord sur l'hydrogène en général : moyen de stockage de l'énergie intermittente produite par l'éolien et le solaire ; alimentation des piles à combustibles pour véhicules routiers et trains ; vecteur d'énergie vers l'industrie, par exemple les aciéries ; etc. C'est ainsi que l'Allemagne a lancé un plan de 9 milliards d'euros sur le sujet. La France vient de lui emboîter le pas avec 7 milliards. La Commission européenne n'est pas en reste. Bien évidemment, la première question qui se pose – en-dehors des utilisations pour le stockage d'énergie, naturellement, lequel ne constitue pas réellement une « production » – est celle d'une production d'hydrogène « vert », sachant qu'aujourd'hui ce gaz provient à 96% d'hydrocarbures ; les 4% restants le sont par électrolyse de l'eau... avec une électricité qui n'est que bien partiellement décarbonée, au niveau mondial. La Commission a ouvert la porte à un hydrogène dit « bleu » (c'est-à-dire un peu moins vert que vert), issu d'hydrocarbures mais avec séquestration du CO<sub>2</sub> ainsi produit ; procédé encore fort incertain qui, toutes proportions gardées, rappelle les polémiques autour de l'enfouissement de déchets d'autre nature...

Était-il inévitable, dans ces conditions, que l'aviation soit elle aussi touchée par cet engouement ? Sans doute. C'est arrivé assez soudainement (par exemple, fin 2017, dans la liste des applications possibles, le Conseil de l'Hydrogène, organisation internationale de lobbying, ne mentionne même pas l'utilisation propulsive et considère comme improbables les piles à combustible pour l'aviation). En France, l'aide apportée par le gouvernement au secteur aéronautique a été assortie de « l'exigence » de développer un avion à hydrogène pour 2035. Airbus s'est publiquement engagé dans cette voie. Jusqu'à présent il s'agissait de 2050, mais la France veut être la nation de pointe sur ce sujet. Comment la France pourrait-elle aujourd'hui mener à bien seule la mise en service d'un avion à hydrogène et de son infrastructure, si ce n'est pour des usages confiden-

tiels, on l'ignore... Mais, heureuse conjonction, l'Union européenne promeut également cette même solution, notamment dans l'Agenda Stratégique (SRIA) récemment proposé par l'industrie pour le futur partenariat public-privé Clean Aviation. Ce dernier est conforté par une analyse réalisée par McKinsey, au terme de laquelle la propulsion hydrogène est considérée comme la meilleure solution (vers 2040 pour les courts courriers, à plus long terme pour les moyens et longs courriers). Certes c'était la question posée et McKinsey est un consultant. Son rapport, basé sur un certain nombre d'interviews d'acteurs des secteurs de l'hydrogène, d'une part, de l'aviation, d'autre part, pointe certes un certain nombre de sujets importants à étudier, mais ne décrit pas, à ce stade, un avant-projet global d'avion et d'infrastructure associée. Il est pourtant urgent qu'une étude d'ensemble, cohérente, par nature peu coûteuse, démontre la faisabilité éventuelle du concept. Puisque nous vivons dans un monde rationnel, nul doute qu'elle sera disponible avant d'engager les centaines de millions d'euros couvrant des plans technologiques à haut TRL, allant logiquement jusqu'à des démonstrations en vol. Et contentons-nous, pour le moment, d'une somme de questions ouvertes...

Il existe certes quelques études « dans les cartons ». Ainsi, Cryoplane, financée par l'Union européenne en son 5e PCRD, en 2003, par Airbus (Allemagne) et quelques coopérants. Le rapport est optimiste – c'est la loi du genre. Mais la plupart des sujets, faute de moyens peut-être, ne sont pas traités avec une profondeur suffisante pour convaincre de la faisabilité. Du reste, le thème n'est pas nouveau : on apprend sur le site même de Cryoplane que les premières études d'un avion à hydrogène remontent à 1930. Elles furent suivies de plusieurs autres, classées sans suite.

### PRODUIRE ET TRANSPORTER

L'avion à hydrogène utilise de l'hydrogène liquide (LH<sub>2</sub>). L'hydrogène pressurisé (à 700 b usuellement) est hors-jeu, conduisant à une masse de structures totalement rédhibitoire. Or l'hydrogène liquide est un produit peu courant industriellement : son principal usage en revient aux lanceurs spatiaux, compte tenu de l'excellente impulsion spécifique apportée par le couple « cryogénique » H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>.

Mais, avant de considérer la question de l'avion lui-même, tâchons d'abord de produire de l'hydrogène vert en quantité suffisante. Il ne s'agit pas, en effet, de faire

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

### L'AVION À HYDROGÈNE : AMBITION OU ILLUSION ?

voler quelques avions par-ci, par-là, mais de convertir la plus grande partie possible de la flotte mondiale ; faute de quoi, on reste dans l'anecdote et on perd son temps. L'hydrogène liquide a un « rendement » de l'ordre de 30%, c'est-à-dire que pour produire 1 kWh d'énergie stockée en LH<sub>2</sub>, il faut environ 3 kWh d'électricité (verte). Or la flotte mondiale d'aujourd'hui a consommé 288 millions de tonnes de kérosène en 2018. Oublions la croissance promise, le triplement d'ici 2050. Cette quantité actuelle, transposée en hydrogène liquide, conduit, tous calculs faits, à un besoin de l'ordre de 10 000 TWh, soit 40% de la production électrique mondiale actuelle. Soit encore, un peu plus que la part « non carbonée » de celle-ci (nucléaire compris).

Encore ce raisonnement fait-il preuve de la vision parcellaire que nous avons dénoncée plus haut : ce qui compte vraiment, ce n'est pas l'hydrogène dont aura besoin l'aviation seule, mais la quantité totale pour tous usages ; idem à plus forte raison pour l'électricité décarbonée. Ce qui éclaire d'un jour un peu inquiétant les « plans hydrogène » allemand, français et européen... Certes, il faut être optimiste et aller de l'avant ; on ne peut pas tout mettre en série ; mais au moins, n'est-il pas bon d'avoir quelques réponses prospectives sur ce point avant d'engager des financements de R&D considérables pour véhicules terrestres, aciéries, avions et autres ? Cependant, à ce stade, admettons que la chose soit possible, admettons l'avenir lumineux du photovoltaïque (pourquoi pas ?) ou encore, admettons l'hydrogène « bleu », c'est-à-dire produit à partir du méthane avec piégeage du CO<sub>2</sub>.

Ensuite, cet hydrogène, il faut le transporter. Par camion-citerne dans un premier temps, propose McKinsey. Mais sautons par-dessus ce premier temps « pionnier », car ce qui nous intéresse est la viabilité à grande échelle – mondiale. Donc, par pipeline pour les grands aéroports. Y faire circuler de l'hydrogène liquide pose des problèmes thermiques rédhibitoires, sur de longues distances. Alors, transporter l'hydrogène gazeux et équiper les aéroports eux-mêmes de moyens (énormes) de liquéfaction ? Il existe encore une autre variante : décentraliser dans les aéroports, non seulement la liquéfaction, mais l'électrolyse elle-même.

A cela il faut ajouter le stockage bien évidemment (à 20K). Pour qu'ils le fassent, il faudrait qu'ils soient convaincus de la supériorité commerciale et de l'avenir brillant de ce concept... En fait, seul un investissement des États, massif, pourrait briser ce cercle vicieux. Voilà

encore un sujet qui montre s'il en était besoin qu'une initiative « française » d'hydrogène aéronautique n'a de sens que si elle est accompagnée par (ou si elle sait susciter) une adhésion internationale, au-delà même de l'Europe.

Comme nous l'indiquons plus haut, la principale application « industrielle » du LH<sub>2</sub> est le fait des lanceurs spatiaux. Voilà qui tombe bien : l'Europe, avec la filière Ariane, dispose d'une très bonne expérience de cet ergol. Cependant, la transposition d'un lanceur à un avion commercial est extrêmement malaisée. Enjeux de sécurité (un incident majeur par milliard d'heures de vol), durée de vie des véhicules (60 à 100 000 heures), durée de stockage de l'hydrogène liquide (24/24, 7/7), environnement, architecture, couverture opérationnelle et logistique, tout diffère ; et ne va pas dans le sens, jamais, de conclure à une utilisation avion plus « facile » que sur lanceur spatial. Au moins l'expérience de ce dernier permet-elle de savoir à l'avance quels sont les points les plus durs à considérer. C'est d'un concept d'avion totalement nouveau qu'il s'agit.

#### COMMENT ASSURER LA SÉCURITÉ ?

La sécurité, au sol et à bord : un sujet central. Outre le nécessaire respect objectif des exigences de certification... à définir, nous vivons une époque où « l'aversion au risque », subjective, de la part du public et des politiques atteint des sommets inégalés. Or ceux-ci découvriront vite que l'hydrogène n'est pas de tout repos. Il possède une très faible masse volumique, 70 kg/m<sup>3</sup> ; inconvénient vis-à-vis de la taille des réservoirs (nous y reviendrons), mais aussi, par la petitesse de sa molécule, vis-à-vis des risques de fuite, qui constituent dans le spatial un souci omniprésent. Risques de fuite... et d'explosion, notamment dans une enceinte confinée : la mise en place, à bord, de niveaux d'étanchéité (cryotechnique !) de tous les raccords sans commune mesure avec l'existant, de redondances, de procédures de vérification fréquentes, de nombreux capteurs de détection, voire de systèmes de balayage de certaines enceintes s'imposera. Notons au passage que la zone de lancement d'Ariane est évacuée avant la « mise en froid » des lignes d'alimentation sol... C'est là une question non seulement pour l'avion, mais aussi pour l'aéroport. Ensuite, quelle que soit l'efficacité des isolations thermiques mises en place, l'hydrogène s'évapore en permanence ; il faut faire avec. Pour un lanceur qui reste quelques heures en zone de lancement et dont le vol dure une demi-heure, ce n'est pas rédhibitoire. Pour un avion, c'est, dans l'état actuel des imagi-

nations, difficile à concevoir. Ces points liés à la sécurité sont majeurs.

### DES CHALLENGES TECHNIQUES ET OPÉRATIONNELS D'UNE AMPLEUR INÉGALÉE

Pour un équivalent A320 qui a une capacité de 23 tonnes de kérosène, la même énergie ne requiert que 9 tonnes de  $LH_2$  ; mais ces 9 tonnes, compte tenu de la faible densité, nécessitent à peu près  $150\text{ m}^3$  de réservoir (en intégrant le nécessaire « volume mort ») ; soit un volume plus de quatre fois supérieur à celui du kérosène. Ce stockage ne peut se concevoir dans les ailes : la logique est de l'installer à l'arrière du fuselage, ce qui conduit à un allongement considérable de ce dernier – avec les problèmes de centrage qui en découleront. Quel surcroît de masse en résulte ? Cela dépend entre autres de l'isolation. Les protections thermiques type Ariane (cellulaire de polyuréthane) conduiraient à des épaisseurs rédhibitoires ; il faut en effet, à la différence du lanceur, avoir des réservoirs partiellement remplis en permanence, avec des taux d'évaporation faibles. Il semble plus logique d'aller vers une isolation multicouche sous vide, du type du réservoir hélium liquide d'Ariane 5, ou de celui du satellite infrarouge Herschel... mais dans des dimensions bien plus considérables ! Est-ce faisable sur le plan économique ? Quant à sa masse, il n'est pas pertinent d'en tenter une transposition à l'échelle de l'avion, compte tenu de toutes les différences.

Quelques tentatives ont été faites pour installer des réservoirs d'hydrogène liquide dans l'automobile, à destination de piles à combustibles ou même de moteurs à combustion (BMW), puis abandonnées. Là non plus, aucune transposition ne peut se faire sur un coin de table, compte tenu des différences d'échelle et de conditions.

Quoi qu'il en soit, pour fixer les idées, on peut « craindre », pour l'avion, un ratio de masse de réservoir sur masse d'hydrogène de 5 à 10 ; rappelons que cette masse d'hydrogène pour un équivalent de l'A320 serait de 9 tonnes et que la masse maximale au décollage actuelle de ce dernier est de 79 tonnes. Un effet « boule de neige » s'ensuivrait, conduisant à un redimensionnement complet. De gros progrès sont donc à faire sur la masse des réservoirs... comment ?

Les ballottements du  $LH_2$  liés aux changements d'attitude conduisent à des difficultés de centrage et à des évaporations supplémentaires. Or ces changements d'attitude pour un avion sont très supérieurs (50 degrés)

aux modestes braquages des tuyères d'un lanceur. Il faudra prévoir des anti-ballottants, pour le moins, c'est-à-dire, si cela marche, de la masse supplémentaire.

L'alimentation des moteurs requiert une pression élevée, jusqu'aux alentours de 100 b, sous forme, cette fois, gazeuse. Il faut prévoir des pompes cryotechniques (à débit variable dans une forte plage), et des échangeurs. Une série d'équipements et de lignes cryotechniques sujets au givrage (comme l'isolation thermique du réservoir) ! Comment éviter celui-ci dans la variété de conditions et la durée d'utilisation d'un avion ?

L'avion prêt, il faut le remplir, à partir du stockage au sol. On ne remplit pas un réservoir de  $LH_2$  comme un réservoir d'essence. Il faut une séquence d'assainissement des lignes, de mise en froid, puis le remplissage doit se faire suffisamment lentement pour éviter une trop forte ébullition. Et naturellement à l'écart du public. Au bas mot il faudra compter une ou deux heures pour un avion moyen-courrier. Difficilement compatible avec les taux d'utilisation journaliers des flottes actuelles ! Mais ceux-ci sont-ils appelés à perdurer dans « le monde de demain » ? C'est une autre question.

Citons également le risque de fragilisation hydrogène de certains matériaux, l'incompatibilité avec les élastomères, etc. – d'où un choix de matériaux éventuellement différent de celui d'aujourd'hui, avec là aussi de possibles conséquences économiques. Côté moteur en revanche, si la combustion de l'hydrogène requiert (ou plutôt, permet) un redimensionnement de la chambre (plus courte), elle ne semble pas poser de problème rédhibitoire.

### DES COÛTS DIFFICILES À ESTIMER

Au total, à supposer qu'un tel concept puisse effectivement surmonter ces obstacles et voir le jour « techniquement », il convient de s'interroger sur le coût total de possession. Certes le coût final de l'hydrogène liquide n'est pas à comparer avec celui du kérosène pétrolier d'aujourd'hui mais de 2035 ou 2050 : taxes ou raréfaction, tout porte à croire (et même à espérer, sur un plan écologique) que celui-ci sera beaucoup plus élevé qu'aujourd'hui, rendant peut-être ainsi un avion à hydrogène, même complexe, même lourd, « compétitif ». Mais il faut aussi comparer la solution hydrogène à celle que représente le carburant de synthèse, alias e-fuel, produit en deux étapes : hydrogène par électrolyse, puis combinaison de cet hydrogène avec le  $CO_2$  de l'air (ou du

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

### L'AVION À HYDROGÈNE : AMBITION OU ILLUSION ?

CO<sub>2</sub> industriel « piégé », ce qui joint l'utile à l'agréable) ; ce qui fait que le bilan carbone total est neutre. Par définition, l'étape supplémentaire conduit à un coût de carburant encore plus élevé, mais en sortie de ce processus purement industriel, on se retrouve, en entrée d'aéroport si l'on veut, dans les mêmes conditions qu'aujourd'hui. Certes, un tel carburant « drop-in » nécessite essentiellement des investissements dans le secteur de l'énergie, et non dans la R&D aéronautique ; mais naturellement, nul ne songerait à faire de cette différence d'orientation de fonds publics à venir, un argument en faveur de l'une ou l'autre solution.

Enfin des solutions « simili-hydrogène » si l'on peut dire, alternatives, sont citées, comme l'ammoniac ou des hydrures métalliques, sans avoir encore démontré leur viabilité.

#### UN EFFET CLIMATIQUE FAVORABLE MAIS ENCORE INCERTAIN

Reste à identifier plus précisément les bénéfices de l'hydrogène (ou du carburant de synthèse, ou des biocarburants, etc.) vis-à-vis de l'effet de serre. Il est de plus en plus souligné que l'effet du transport aérien ne se limite pas à celui du CO<sub>2</sub> émis ; les traînées de sillage (contrails), auxquels peuvent s'ajouter les nuages d'altitude (cirrus) qu'elles induiraient, produisent selon certaines études un effet de serre à peu près équivalent au CO<sub>2</sub> ; mais il s'agit de phénomènes très complexes sur lesquels on

dispose aujourd'hui de peu de mesures. En outre, il existe une influence des NO<sub>x</sub>, complexe elle aussi puisque d'une part, ceux-ci produisent de l'ozone (effet de serre accru) et d'autre part, réduisent la présence de méthane (d'où un effet affaibli) : la résultante est quelque peu incertaine encore. En tous cas, l'hydrogène produirait plus de vapeur d'eau, mais pas de particules contribuant à l'agrégation des contrails, donc, au final, un effet relatif sur lequel il est difficile de conclure ; et de même, moins de NO<sub>x</sub> grâce à une combustion plus rapide. Au total, l'étude de McKinsey annonce un effet de serre réduit de 50 à 75% (moyennant bien sûr un hydrogène totalement « vert »).

On n'en a pas fini d'étudier et de préciser les conséquences climatiques de l'aviation, ainsi que les réponses technologiques possibles, d'une part par la réduction à l'extrême du besoin d'énergie à travers de nouveaux progrès de l'avion et de son système propulsif, d'autre part par la mise au point d'un carburant non fossile accessible (ou plusieurs), en inscrivant la demande aéronautique dans une approche globale des sources d'énergie primaire. Il y faudra beaucoup de persévérance, d'humilité et d'honnêteté. ■

# Points de vue croisés sur les phénomènes aérospatiaux non identifiés observés en infrarouge et radar

par Luc Dini, président de la Commission technique SIGMA 2, Jean-Marc André, général de brigade aérienne, ancien pilote et spécialiste de défense aérienne, Joël Deschamps, retraité de l'ONERA, expert et ancien chargé de recherche sur l'observation et mesures de signatures infrarouges

## Résumé

L'observation de Phénomènes Aérospatiaux Non identifiés (ou PAN) n'est pas nouvelle, même si elle reste mystérieuse à bien des égards. Depuis les années 30-40 (voire bien avant) de nombreux témoignages ont été rapportés et des enquêtes menées dans différents pays par les armées de l'air (rapport Blue Book de l'US Air Force, programme Condigm UK, travaux du GEIPAN en France depuis 1977, programme SETKA en Russie), etc.) rassemblant des observations visuelles, radar, des photos ou des films. Plus récemment, les caméras infrarouges se sont déployées, notamment sur les avions de surveillance ou sur les chasseurs, procurant de nouveaux enregistrements, parfois très étonnants. Cependant l'infrarouge très utile pour détecter un objet, pour l'identifier, nécessite d'autres moyens pour estimer les distances et vitesses notamment, comme les radars. Cet article a pour but de décrire trois cas d'observations de PAN avec des moyens IR croisés couplés à des observations radar, en commençant par le cas Cougar (2011, Marine Chilienne), Aguadilla (2013, Porto Rico, avion de surveillance côtière), et Nimitz (observations IR par des F18 de l'US Navy et des radars du Nimitz et du Princeton en 2004, puis en 2014-2015 à nouveau par des F-18). Ce dernier cas est le plus fameux et défraye la chronique depuis décembre 2017, avec la publication d'articles dans le New York Times, accompagnée de la révélation d'un programme de recherche secret AATIP<sup>1</sup> du Pentagone sur les UFOs (Unidentified Flying Objects). Ces vidéos IR (reconnues authentiques par le Pentagone en avril 2020) fournissent des données en 2D. Elles nécessitent de connaître aussi la position de la plateforme d'observation, son attitude et les données de contexte, notamment radar, pour reconstituer les distances et en déduire une cinématique en 3D.

## LE CAS COUGAR : 2011 - CHILI

Le cas Cougar date du 11 Novembre 2011 et nous a été transmis par le CEFAA<sup>2</sup> en 2014. L'étude que nous avons menée est relatée dans la lettre 3AF N°27 et sera détaillée dans le rapport à venir de la Commission technique SIGMA2. Pour résumer, un hélicoptère chilien observe pendant deux minutes environ un phénomène inconnu avec sa caméra IR. La vidéo infrarouge, de qualité moyenne, présente des effets de saturation et permet néanmoins une exploitation des images. Elle fait ressortir deux ou trois points chauds<sup>3</sup>, puis l'émission d'un panache. Les données radar fournies par le CEFAA brésilien ont pu être exploitées, permettant de connaître le trafic aérien régional, d'être recoupées et permettre l'identification et l'estimation des distances (voir Figure 1). Ce cas est exemplaire du point de vue de la restitution de l'observation, mettant en défaut la conclusion à un OVNI faite par les Chiliens.

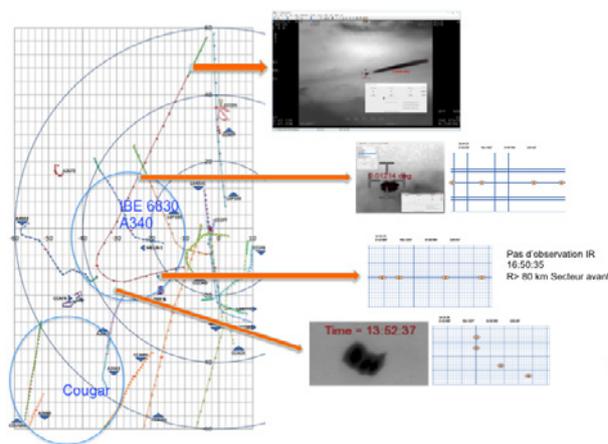


Figure 1 - Trajectoires reconstituées du Cougar et du vol IBE 6830 (Airbus A340) - points d'observation spécifiques et images associées - géométrie des points chauds dans le plan image

<sup>1</sup> AATIP : Advanced Air THreat Investigation Program

<sup>2</sup> CEFAA : organisme dépendant de l'aviation civile chilienne en charge des études de PANx

<sup>3</sup> Le groupe IPACO avait exploité la vidéo est identifié deux à trois points chauds faisant penser à un biréacteur moyen courrier. Toutefois l'émission du panache par un avion volant à 4000 m restait sans explication.

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

## POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR

### LE CAS AGUADILLA

Le rapport « 2013 Aguadilla Puerto Rico UAP » a été soumis à la commission 3AF/SIGMA2 en mai 2015, accompagné de ses données (données radar et vidéo infrarouge) par un groupe scientifique intitulé Scientific Coalition For UFO (SCU). Il peut être consulté via le lien suivant : [https://24d63f27-e686-40c4-adce-0870e805ceec.filesusr.com/ugd/299316\\_9a12b53f67554a008c32d48eff9be5cd.pdf](https://24d63f27-e686-40c4-adce-0870e805ceec.filesusr.com/ugd/299316_9a12b53f67554a008c32d48eff9be5cd.pdf)

Ce rapport rend compte de l'étude approfondie d'un cas de PAN observé sur le site de l'aéroport Rafael Hernandez à Aguadilla, Porto Rico, le 25 avril 2013 à 21h20 (heure locale) à partir de témoignages, d'un enregistrement vidéo IR par un avion de surveillance côtière et de données radar de contrôle aérien civil.

#### Les observations

L'avion de surveillance côtière est alerté par la tour de contrôle de la présence d'une lumière rouge inconnue en rapprochement vers l'aéroport. L'avion fait deux boucles et enregistre avec sa camera infrarouge (et le télémètre laser) un objet pendant environ deux minutes. La vidéo IR (voir Figure 2) est de mauvaise qualité du fait du traitement d'image (saturation, inversions de contraste) et ne permet pas d'exploiter précisément les images, les formes ou de trouver des points de recoupement dans l'image et sur la carte pour estimer la distance et reconstituer la trajectoire du phénomène en 3D. De plus le télémètre laser mesure en réalité la distance avion-point d'impact du laser au sol, ce qui permet de restituer l'enveloppe des lignes de visée Camera et laser sur laquelle l'objet se déplace. Cette restitution est conforme au relief du terrain, mais la position du phénomène et son altitude restent inconnues ?

Nous avons également tenté de recouper les observations IR et les données radar (voir Figures 3 et 4) pour obtenir la position de l'objet. Malheureusement, les données radar font apparaître une série de plots en déplacement de l'est vers l'ouest, correspondant principalement à des déplacements de nébulosités poussées par le vent. Certains pourraient correspondre à la position de l'objet, mais ponctuellement et sans certitude, compte tenu de la position de l'avion dont les échos radar s'éloignent à l'Ouest. En revanche, la position de l'avion relevée par le radar et celle inscrite sur la vidéo, ainsi que le défilement du paysage, coïncident ce qui confirme l'authenticité de la vidéo et de l'observation.

L'absence de trace radar pourrait s'expliquer soit par la faible signature radar du phénomène, soit par l'absence de mesures permettant d'identifier la distance ou l'altitude du phénomène. Ce qui nous amènera à faire une restitution basée cette fois sur trois hypothèses d'altitude de vol pour simplifier :

- Cas d'une trajectoire basse altitude avec un vol rasant à environ 100 ft, ce qui pourrait correspondre à un vol rasant au-dessus de l'eau en final. L'objet n'est pas visible au radar, ce qui pourrait attester l'hypothèse de vol rasant, même si la faible signature pourrait le justifier.
- Cas d'un vol local à moyenne altitude (environ 600 ft), correspondant à une trajectoire locale en descente lente autour du point de recoupement des lignes de visée de l'avion. L'objet pourrait être visible au radar, or il ne l'est pas.
- Cas d'une trajectoire haute altitude à proximité de l'avion, où l'avion et l'objet évolueraient sur deux trajectoires concentriques et proches. L'objet volant haut pourrait être visible au radar ; il ne l'est pas, alors que l'avion est visible au radar.



Figure 2 – Image IR de l'objet avec effet d'inversion de contraste du fond de paysage IR (effet de traitement local d'image). L'objet est à droite et à la base de la croix de visée

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

## POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR

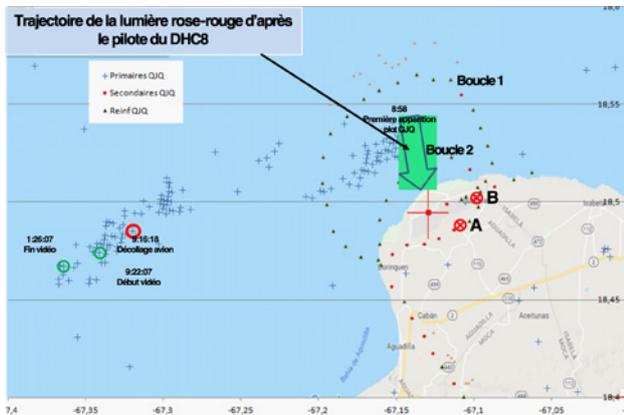


Figure 3 – Trajectoire du DHC-8 restituée à partir de la vidéo (en vert) superposée à la carte des échos radar

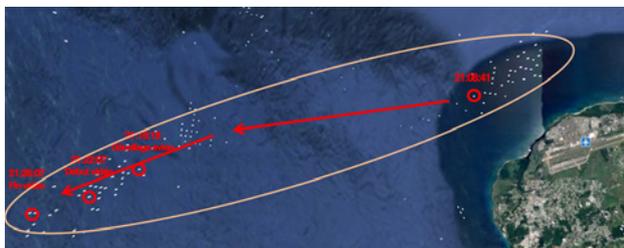


Figure 4 – Positions successives de l'écho qui a alerté les contrôleurs avec une dérive des plots vers l'Ouest

Des phénomènes étranges ont été constatés sur certaines séquences de l'observation IR :

- L'inversion de contraste (voir Figure 2) lors du survol du plan d'eau (liée au gain de traitement d'image local).
- L'occultation temporaire ou la forte atténuation de

la signature thermique du phénomène observé en final sur fond de mer (voir Figure 5) . Plusieurs interprétations sont possibles selon les trajectoires et les altitudes envisagées. Pour un objet lent évoluant autour de 600 ft, l'occultation serait liée à des nuages, mais ceux-ci devraient masquer aussi le fond de paysage et pas seulement l'objet...Or ce n'est pas le cas, ce qui ne conforte pas l'hypothèse d'une trajectoire finale moyenne altitude (cas d'une trajectoire locale lente). Le SCU nous a transmis son rapport faisant l'hypothèse d'une trajectoire très basse au-dessus de l'eau, avec un plongeon « sans splash », tout en montrant une trace thermique résiduelle, plus froide, de l'objet. Il serait immergé temporairement, en mouvement sous l'eau (voir Figure 6). Nous ne retenons pas cette hypothèse extraordinaire qui n'est pas physique (l'eau est opaque à l'infrarouge et devrait effacer totalement la signature thermique). Enfin, si l'on retient l'hypothèse du vol rasant au-dessus de la terre puis de l'eau, il nous paraît envisageable que l'objet puisse alors « surfer » au ras des vagues, soulever des embruns et voir sa signature thermique occultée temporairement par cet effet de brumisation (voir Figures 5 et 6) . Cette hypothèse conforterait la solution du vol rasant, qui pose cependant d'autres questions.

- Le phénomène redevient visible après le passage sur le fond de mer (survol, vol rasant ou immersion selon certains) et semble se diviser en deux taches thermiques similaires. S'agit-t-il d'une séparation physique de deux points chauds alors qu'on en observait qu'un ? Ou

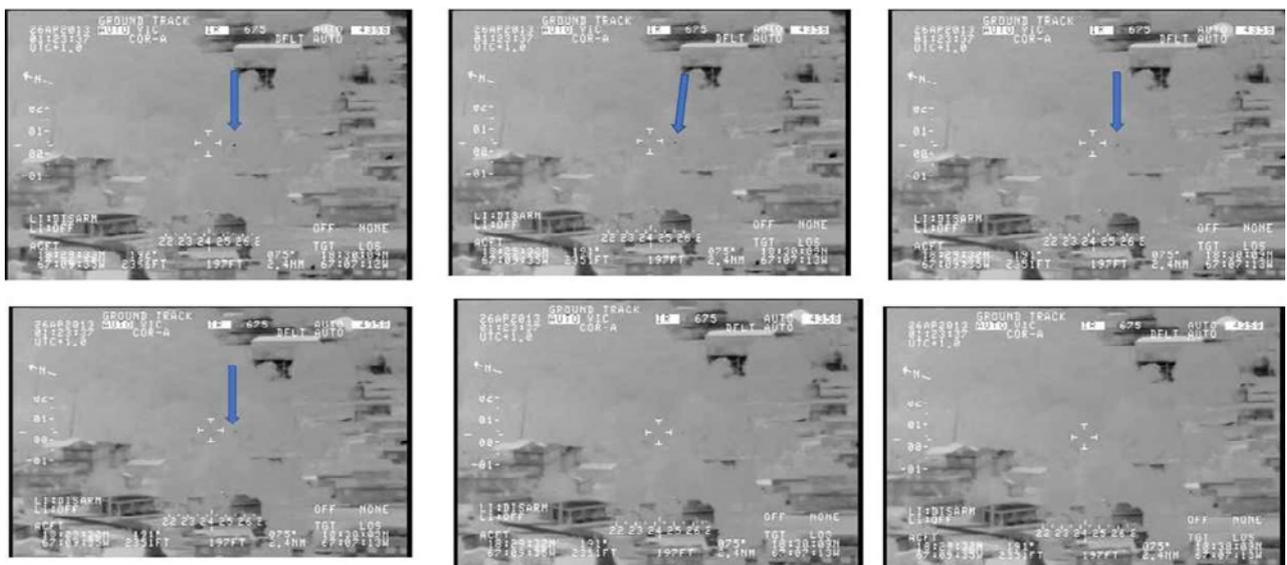


Figure 5 – Suite d'images montrant l'occultation temporaire de l'objet durant le survol du fond de mer

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR

d'une réflexion parasite dans l'objectif ; normalement le reflet est en général moins intense que la source ? Ou bien s'agit-t-il d'une lanterne Thaï avec deux parties chaudes comme certains l'ont pensé. Le mystère reste entier... Nous pourrions aussi imaginer un scénario de film de James Bond avec un drone de reconnaissance, revenant de mission et recueilli par une équipe de SEALs équipée de deux jet-skis (deux points chauds), mais ce scénario est assez fantaisiste, quoique moins extraordinaire que celui d'un OVNI immergé, surgissant de l'océan pour se diviser en deux objets. Ce n'est pas notre hypothèse ici.

Figure 6 – L'une des images semble montrer l'immersion de



l'objet (selon le SCU), sans splash tout en laissant une trace thermique atténuée

#### Les hypothèses de cinématique de l'objet

En l'absence de recoupement des observations sur l'altitude et la distance de l'objet, nous avons reconstitué l'enveloppe des lignes de visée (voir Figure 7) de l'avion au « target » (point d'impact de la tache laser au sol), puis fait des hypothèses de profil de vol, et notamment d'altitude. Nous avons alors tracé la trajectoire supposée de l'objet répondant à ces hypothèses cinématiques tout en les croisant avec les lignes de visée, révélant alors une trajectoire possible sur cette enveloppe (voir les Figures 8 à 12).

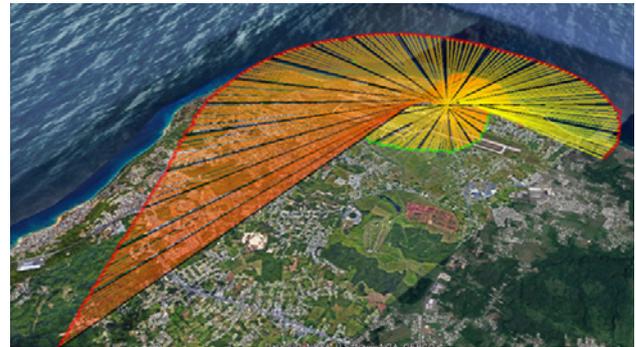


Figure 7 – En rouge : trajectoire du DHC-8 ; en vert : positions du target



Figure 8 – La projection de la trajectoire du PAN est dans la zone jaune

Trois types de profil de vol ont été étudiés autour d'hypothèses de taux de descente et d'altitude :

- **Profil de vol très proche de celui de l'avion.** Cette hypothèse d'école qui consiste à supposer les trajectoires avion et objet (altitude avion de moins de 100 ft) proches et parallèles en tournant autour de l'aéroport. Elles ne correspondent pas à un scénario crédible, la distance avion objet étant alors très faible. On n'explique ni la trajectoire, ni le scénario et encore moins la piètre qualité de l'image, alors que l'objet serait observé à courte distance et devrait bénéficier d'une meilleure qualité d'image.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR

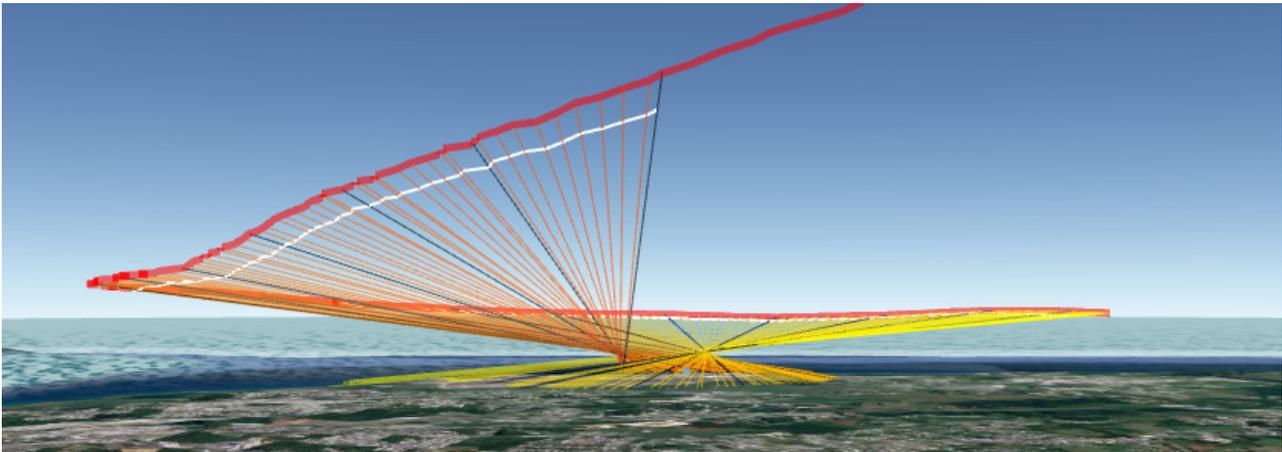


Figure 9 – Profil PAN « en accompagnement » de l'avion d'observation (on a fixé arbitrairement un différentiel d'altitude de -100 pieds par rapport à l'altitude du DHC-8).

- **Profil de vol en suivi de terrain à très basse altitude** (autour de 100 ft sol) qui peut correspondre à un survol rasant de la terre puis de la mer durant la dernière phase de vol. Le profil pourrait être celui d'un micro-drone. Sa vitesse varierait de 300 km/h au début à 100-120 km/h en phase finale au-dessus de l'eau, ce qui montre une dynamique de vitesse un peu extrême en limite haute vitesse (les micro drones atteignent en général 150 km/h) mais certains drones spéciaux (dotés d'une propulsion par gaz ou micro turbo réacteur) peuvent atteindre des vitesses de 300 à 400 km/h ou plus, avec des vitesses de décollage et d'atterrissage très faibles. Rien ne dit d'ailleurs que l'objet ne pourrait partir d'une altitude plus élevée et d'une distance plus proche, donc avec une vitesse initiale plus basse en début d'observation, et un taux de descente plus important pour rejoindre l'altitude de suivi de terrain ? Ceci n'est pas étudié ni démontré. En outre la signature thermique avec un point chaud suffisamment élevé pourrait confirmer l'hypothèse d'une propulsion thermique ou avec des tuyères à gaz chaud. Il reste cependant à comprendre la présence d'un micro-drone rapide au voisinage de l'aéroport ? L'hypothèse est elle erronée ? S'agit-il d'un test avec un micro-drone spécial (forces spéciales). La question est ouverte et ne relève pas de nos compétences.

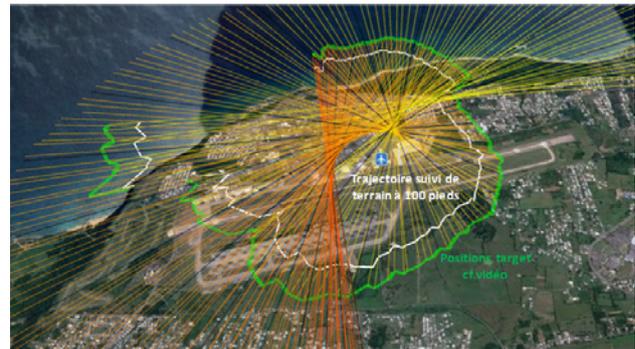


Figure 10 – En blanc : la trajectoire PAN en suivi de terrain à 100 pieds

- **Profil de vol à altitude intermédiaire en descente lente** (2 ft/s) entre 800 et 1000 ft. L'objet suit une trajectoire au voisinage de l'aéroport, à très faible vitesse (18 à 40 km/h), au croisement des lignes de visées, l'avion tournant autour de la trajectoire de l'objet. La faible vitesse compatible d'un objet type ballon, drone ou ULM est cohérente avec le vent local (recoupement de direction et de vitesse), l'objet pouvant dériver lentement en descente. En revanche, si la cinématique est crédible, il y a un très faible recoupement avec les données IR : la signature thermique d'une lanterne Thaï est très faible en regard des points chauds observés. En outre l'occultation de signature (en fin de trajectoire sur fond de mer) n'est pas expliquée. À l'altitude considérée (environ 600 ft) seules des nébulosités pourraient expliquer l'occultation de l'objet, mais elles masqueraient aussi le fond de paysage (mer), qui lui, reste visible.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR



Figure 11 – Trajectoire PAN pour le couple 1000 pieds/-2 pieds/s

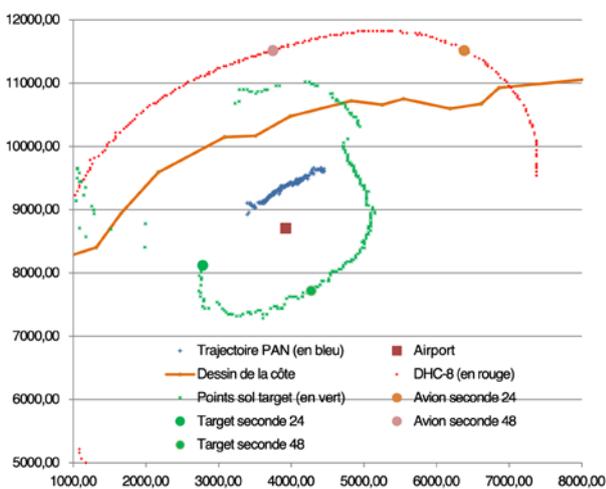


Figure 12 – Trajectoire (en bleu) pour altitude initiale de 1000 pieds et vitesse verticale de -2 pieds/s

En conclusion, nous pouvons affirmer qu'une observation infrarouge d'un PAN a été faite, et qu'elle recoupe la trajectoire de l'avion dont la trace radar est aussi confirmée. La trace radar du PAN n'est pas visible (invisible ou volant trop bas, ce qui dans ce cas confirmerait éventuellement une trajectoire très basse altitude).

Les images infrarouge confirment un point chaud qui pourrait être compatible d'une propulsion électrique ou thermique et une taille inférieure à 2 m. Cependant, du fait de leur piètre qualité, aucun recoupement ne peut être fait entre les lignes de visée, l'image et des points caractéristiques du paysage ; ce qui aurait permis de faire un recalage en distance et altitude d'une trajectoire possible. Des phénomènes d'occultation de l'objet en fin d'observation sont remarquables. Une explication par la couverture nuageuse n'est pas démontrée (le fond n'est pas masqué). En revanche, un profil de vol en suivi de terrain pourrait être compatible avec un effet de brumisation lors du vol final d'un drone au ras de la mer. Enfin, une sorte de dédoublement final des points

chauds apparaît en final ; aucune explication convaincante (séparation par rupture, réflexion parasite,...) n'est obtenue.

Du point de vue cinématique deux hypothèses se dégagent. L'une correspond à une trajectoire locale au voisinage de l'aéroport en descente lente (2 ft/s) entre 1000 et 800 ft, compatible avec celle d'un ballon ou d'une lanterne Thaï, voire d'un micro-drone, dérivant à faible vitesse en étant porté par le vent. Mais cette hypothèse, qui aurait le mérite de correspondre à un scénario simple et à une cinématique classique, n'est pas cohérente avec les données radiométriques (point chaud, occultation). L'autre hypothèse pourrait correspondre à un suivi de terrain à 100 t, au moins en deuxième partie de trajectoire ; ce qui pourrait expliquer certains phénomènes observés (point chaud, occultation temporaire de la signature en vol rasant au-dessus de la mer). Il pourrait s'agir d'un micro-drone avec des capacités de haute vitesse extrêmes (près de 300 km/h) en début de trajectoire, comme il en existe quelques prototypes. Cependant, le scénario d'emploi d'un tel drone semble très atypique. Une hypothèse de changement de niveau de vol avec descente rapide pourrait éventuellement changer le pic de vitesse initial mais ne résout pas les questions comme le dédoublement.

Rien ne permet de confirmer un cas de PAN extraordinaire, même si nous sommes face à des indéterminations sur la restitution des trajectoires et donc du type d'objet volant, voire face à des interrogations sur certains phénomènes IR (occultations, dédoublement).

Les deux hypothèses retenues présentent chacune des avantages et inconvénients.

#### LE CAS D'OBSERVATION IR À PARTIR DE F18 DE L'US NAVY

Comme nous l'avons déjà expliqué, nous avons eu connaissance de ces cas par les vidéos IR qui ont été recueillies par les F18 du Nimitz en 2004 et diffusées aux médias américains par la société TTSA (ayant travaillé pour le Pentagone sur le programme de recherche AATIP sur les menaces aériennes avancées). Par ailleurs, le SCU (Scientific Coalition for UFO) nous a communiqué un rapport d'analyse de ces observations intitulé A Forensic Analysis of Navy Carrier Strike Group Eleven's Encounter with an Anomalous Aerial Vehicle.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR

Aucun rapport de l'US Navy n'a été diffusé depuis, relatant les faits et les observations non seulement visuelles, ou infrarouge, mais aussi radar. Nous avons pu écouter les témoignages des pilotes ou des opérateurs radar du Nimitz ou du Princeton, mais aucun rapport circonstancié n'est accessible. Néanmoins, le Pentagone et l'US Navy ont reconnu l'existence d'un programme de recherche sur les menaces aériennes avancées (dont les PANs ?) et également les incursions dans l'espace aérien américain d'objets inconnus (confirmé récemment par le North Command US) qui font l'objet maintenant de comptes rendus. Le Pentagone a formé une Task Force sur les UAPs (PANs en anglais) en août 2020 <sup>4</sup> sous leadership de l'US Navy. Parallèlement, le Japon a lancé également une organisation similaire et conclu un accord de coopération avec les USA <sup>5</sup>.

À ce stade, nous nous contenterons de faire part de commentaires simples sur les faits qui sont relatés dans le rapport du SCU, ainsi que sur les vidéos IR que nous avons visualisées.

Il est aisé de comprendre après l'illustration des deux cas précédents, où nous avons croisés des données IR et radar avec un succès variable, que les données fournies par les trois vidéos IR sans données radar précises, ni restitution, ni trajectoires et cinématiques, sont largement insuffisantes pour en tirer la moindre conclusion. Comment en effet reconstituer des images en 3D pour évaluer les cinématiques, la signature (énergie rayonnée), voire la forme ou la taille, sans information sur la position de la caméra, du F18 et de l'objet ?

Seule la vidéo « GO Fast » est d'une qualité suffisante pour réaliser une analyse de l'image pour tenter d'identifier le PAN, sous réserve d'avoir les informations de contexte déjà évoquées, non disponibles à ce jour. Le point de vue croisé radar-IR est nécessaire.

### Analyse du rapport et des faits relatés

Pendant plusieurs jours (10 au 13 novembre 2004), durant un exercice naval au large de San Diego, des vagues de 8 à 20 PAN sont observées au radar SPY-1 (voir Figure 13).

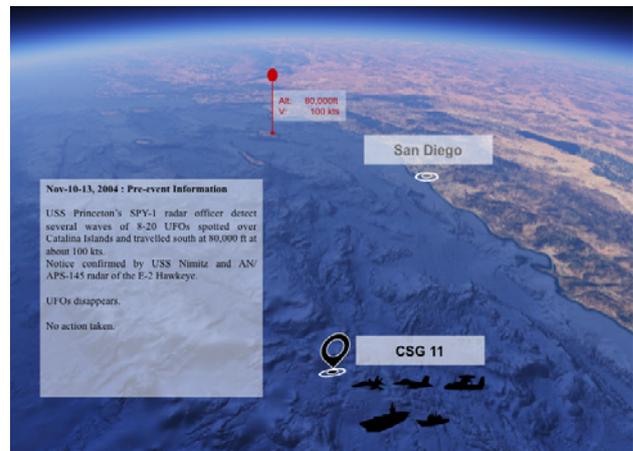


Figure 14 – Observation radar (Porte-avion Nimitz-croiseur Aegis Princeton)

Le détail des événements qui surviennent jusqu'au 14 novembre (date de l'enregistrement infrarouge par un F18) est relaté ci-dessous. Le 14 novembre, suite aux observations radar multiples, le Nimitz envoie plusieurs patrouilles de F18 en mission d'interception sur la zone. L'une d'elle établit un contact visuel avec un objet de forme oblongue (tictac) observé au-dessus de l'eau puis se déplaçant rapidement (voir Figure 14). L'une de ces patrouilles obtiendra un contact radar et procédera à un enregistrement infrarouge diffusé depuis (vidéo FLIR 1 et Gimbal).

Il est troublant de constater que ces observations n'ont pas été corroborées officiellement par l'US Air Force ou le NORAD, alors qu'elles correspondaient à une intrusion dans l'espace aérien américain 3 ans après le 11 septembre. Pour autant, l'existence révélée du programme AATIP, mais aussi les déclarations récentes du Pentagone (avril 2020), de l'US Navy et enfin du North Command, attestent d'observations régulières de la présence d'objets inconnus, drones chinois, russes ou d'autres origines, selon les hypothèses formulées. Les observations de 2004 puis de 2014 et 2015, par des radars et des moyens IR sont donc a priori réelles et non des défauts des capteurs ou des fausses alarmes.

Certains supposent des tests d'engins de technologies avancées ou de technologies de brouillage très avancées (à partir de drones, projet NEMESIS ou bien de leurrage/brouillage par plasmas filamenteux). Ces sujets sont abordés dans notre rapport SIGMA2 à venir.

<sup>4</sup> <https://www.defense.gov/Newsroom/Releases/Release/Article/2314065/establishment-of-unidentified-aerial-phenomena-task-force/>

<sup>5</sup> <https://www.the-unidentified.net/japan-and-the-united-states-have-an-alliance-over-unidentified-aerial-phenomenon-uap/>

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR

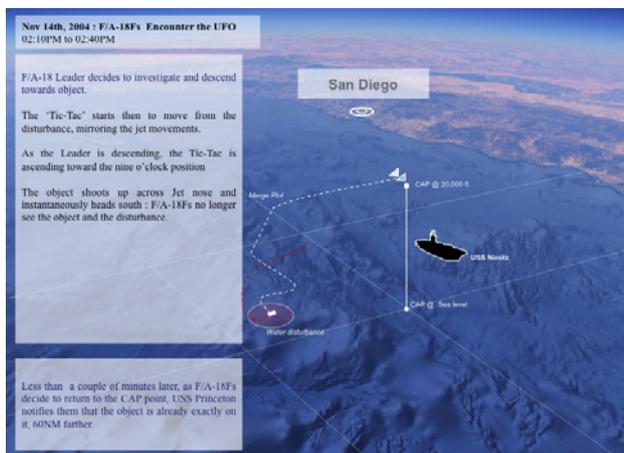


Figure 14 – Entre 14:10 et 14:40 LT : les équipages des F18 observent un PAN en forme de « Tic-Tac ».

### Analyse des vidéos IR

Nous sommes en possession de 3 vidéos nommées respectivement FLIR 1, gimbal et Go Fast. Elles sont diffusées par « To the stars academy of arts and science ». Ces vidéos ont été acquises par le pod AN/ASQ 228 de Raytheon mis en service en 2003 et installé sur F18. Seule la première vidéo est datée de 2004 et donnée comme associée au cas Nimitz ; les deux autres sont présentées comme des observations de PANs effectuées par l'US Navy sans plus de précisions. L'US Navy a reconnu depuis l'authenticité des vidéos et mentionné l'existence d'autres vidéos, de meilleure qualité.

### Vidéo FLIR 1

La vidéo (voir Figure 15) dure 1min 14 s pendant lesquelles on observe un objet en IR puis en visible. Le site et le gisement de la ligne de visée sont très stables, sauf une augmentation du gisement en fin de vidéo. En IR, l'objet semble être un point saturé sans structure apparente, par contre en visible il présente nettement une forme allongée.

La vidéo, globalement de mauvaise qualité, rend difficile une identification de l'objet.

On note cependant que l'objet apparaît nettement plus grand en visible qu'en IR. Pourtant dans les 2 cas, le champ des capteurs semble le même (NAR) d'après les incrustations ?

Un défaut image dans le pod n'est pas à exclure sachant qu'on peut lire que les premiers pods de cette famille installés sur F115 ont connu quelques problèmes de mise au point.



Figure 15 – Vidéo FLIR 1

### Vidéo Gimbal

Cette vidéo dure 35 s, elle n'est ni localisée, ni datée. Elle est de meilleure qualité (voir Figure 16) que la précédente. Sur une mer de nuage, on observe un objet oblong alors que le F18 est en virage à gauche. Le site de la ligne de visée reste constant à  $-2^\circ$  et le gisement varie de  $54^\circ$  gauche à  $5^\circ$  droite.

Le plus surprenant est que l'objet change d'inclinaison lorsque le gisement est compris entre  $-5$  et  $+5^\circ$ , comme si sa position était liée à l'angle du miroir de tête du pod. Le commentaire des pilotes atteste de leur surprise face à un changement d'attitude qui défie les lois de la mécanique de vol, puisque plaçant l'objet orthogonalement à l'écoulement aérodynamique.

Un défaut dans le plan focal intermédiaire du système optique du pod nous semble plausible. Ce n'est peut-être pas un hasard si cette vidéo s'appelle Gimbal.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ POINTS DE VUE CROISÉS SUR LES PHÉNOMÈNES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS OBSERVÉS EN INFRAROUGE ET RADAR



Figure 16 – vidéo GIImbal

### Vidéo Go Fast

Certainement la vidéo la plus intéressante car la plus nette des 3 (voir Figure 17). Elle est probablement plus récente (observations de 2014).

Elle dure 30 s. L'avion est à 25000 pieds en vol à plat, puis dans la dernière partie de la vidéo en virage gauche. La ligne de visée commence à  $-22^\circ$  site et  $35^\circ$  gauche gisement en début de vidéo, pour rejoindre régulièrement  $-34^\circ$  site et  $55$  gauche gisement.

L'objet est un point chaud ponctuel se déplaçant rapidement sur fond de mer. L'opérateur rate l'accrochage de la poursuite à 3 reprises puis réussit l'accrochage et active la poursuite automatique.

La résolution angulaire est trop faible pour identifier le PAN, mais on peut dire qu'il s'agit d'un objet chaud de petite taille. Lorsque la poursuite automatique est enclenchée, il apparaît une incrustation 4.0 RNG. Si on considère qu'il s'agit d'une mesure de distance sur l'objet, celui-ci est à 7,4 km de l'avion alors que l'altitude de vol est de 7,7 km. On aurait donc bien un objet volant rapidement à une altitude intermédiaire. Sous ces conditions, une analyse géométrique du PAN est envisageable.



Figure 17 – Vidéo GO FAST

En conclusion, seule la troisième vidéo peut fournir des informations pertinentes ; les deux premières sont d'une trop mauvaise qualité pour espérer en extraire des informations. ■

# La commission Propulsion 3AF

par Michel Desauty, président de la Commission technique Propulsion et Christophe Bonhomme, vice-président de la Commission technique Propulsion

*La Commission Propulsion comporte 15 membres actifs (dont 6 émérites et 6 séniors) représentant le tissu industriel, les établissements publics et le monde scientifique français et qui ont pour certains une expérience de plus de 40 ans dans le domaine de la propulsion. La Commission Propulsion a à déplorer la perte en 2020, de son plus éminent représentant en la personne de Paul Kuentzmann qui contribuait de manière active au rayonnement de la Commission.*

Comme l'ensemble des commissions de la 3AF, la commission Propulsion s'intéresse aux deux piliers de l'activité aérospatiale, l'aéronautique et le spatial qu'ils soient civils ou militaires. Dans cette perspective, elle porte une attention toute particulière aux moteurs aérobies qui incluent les turbomachines et les statoréacteurs et les moteurs anaérobies, moteur-fusée à propergol solide, à ergols liquides et hybrides et propulseurs spatiaux électriques.

Sa vocation est de promouvoir la recherche, le développement et l'implémentation de concepts nouveaux en assurant une fertilisation croisée entre les différents acteurs industriels de la propulsion et via un lien actif entre le monde académique et celui de l'industrie.

Les conférences du soir (environ trois à quatre par an), organisées de façon conjointe avec le groupe Ile-de-France, sont l'un des outils de la commission. Elles traitent de sujets d'actualité et de technologies émergentes susceptibles d'impacter le monde de la propulsion. Si les conférences se tiennent physiquement au CNES à Paris, le recours à la téléconférence a permis depuis 2018 d'étendre l'audience à l'ISAE-ENSMA. Il est prévu de poursuivre cette démarche en incluant d'autres sites.

Le deuxième outil est constitué par les dossiers qui dressent un bilan des avancées les plus significatives et des perspectives dans le domaine de la propulsion. Le dernier dossier réalisé en 2015 porte sur la « Propulsion Spatiale 2015-2050 ». La commission Propulsion apporte son soutien à la commission Energétique dans la rédaction d'un dossier relatif à la propulsion hybride électrique et à l'énergie non-propulsive dans le domaine aéronautique.

Ainsi, l'objectif de la commission Propulsion est de contribuer à relever les défis auxquels est confronté le

monde de la propulsion, qui sont de natures diverses mais nécessitent tous une évolution rapide des technologies.

Pour le transport aérien civil, sous la pression sociétale, la baisse drastique des émissions de CO2 est devenue incontournable. Les innovations incrémentales ne suffiront pas pour réduire significativement l'empreinte carbone. Aussi, des solutions en rupture sont-elles recherchées dans les domaines des architectures moteur, des carburants, et de l'hybridation électrique.



*Illustration extraite de la conférence du soir « Le futur de la propulsion aéronautique » du mercredi 31 janvier 2018 par Jérôme Bonini (Safran)*

Dans le domaine de la Défense, suite au lancement du système de combat aérien du futur (SCAF) en 2017, le développement d'un avion de combat de sixième génération (New Generation Fighter) a été engagé en 2019 avec les allemands. Le moteur équipant cet avion devra être au meilleur état de l'art international lors de l'entrée en service de l'avion en 2040.

Si les moteurs d'avion de combat partagent avec le domaine civil de nombreuses technologies, notamment au niveau du corps haute pression, le respect des exigences relatives aux capacités de manœuvrabilité, au domaine de vol et à la discrétion nécessite le développement de solutions spécifiques exploitant les progrès les plus récents dans les domaines de la simulation numériques aérodynamique, thermique et mécanique, des matériaux et des systèmes.

Les engins hypersoniques, tels que des missiles de croisière, pourraient constituer également l'une des composantes du programme SCAF. La mise au point d'un statoréacteur nécessite de surmonter de nombreux défis

scientifiques et technologiques. Là encore, plusieurs disciplines sont mises en jeu, comme la combustion, les matériaux, l'aérodynamique, ou la thermique.

Des concepts alternatifs sont aussi à l'étude, par exemple en remplaçant la combustion par une succession d'ondes réactives de détonation (moteur à onde de détonation continues rotatives). C'est l'un des sujets abordés lors du workshop ICVDCW (International Constant Volume Detonation Combustion Workshop) organisé avec l'AIAA en Juin 2017. Une seconde édition de ce workshop a eu lieu à l'Université de Purdue en août 2019

Dans le domaine des lanceurs, l'arrivée sur le marché des nouveaux acteurs, SpaceX entre autres, a amplifié la nécessité de réduire les coûts. Ariane 6 va y répondre à court terme par son coût moindre par rapport à Ariane 5 et par sa polyvalence, se traduisant par sa capacité à envoyer dans l'espace tous les formats de satellites aussi bien en orbite basse que haute en fonction du besoin et de la complexité de la mission.

Pour rester dans la course à moyen terme, la France et l'Europe travaillent dès maintenant sur la génération suivante de lanceurs et en particulier sur l'aspect réutilisation des étages. Pour cela, du côté propulsion, le projet Prometheus a été mis en place. Il s'agit d'un démonstrateur / précurseur de moteur bas coût (10 fois moins cher qu'un moteur Vulcain 2 d'Ariane), réutilisable, et utilisant un nouveau couple d'ergols : l'oxygène liquide et le méthane liquide. Et il n'est pas innovant qu'à ce titre : à la différence de ses prédécesseurs, ce moteur couvre une très large plage de fonctionnement, indispensable pour le retour de l'étage, et ouvre la part belle à la fabrication additive.

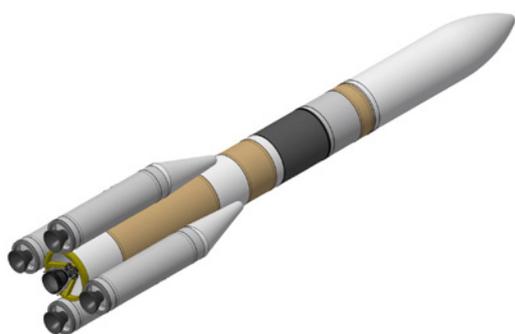


Illustration extraite de la conférence du soir « Ariane 6 » du 27 Janvier 2016

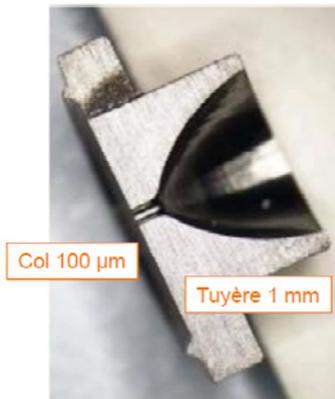


©ArianeGroup Holding

Moteur Prometheus – Oxygène liquide / Méthane liquide, réutilisable

Les conférences du soir sont l'occasion d'inviter des personnalités impliquées dans les travaux visant à relever ces défis. Ainsi, trois conférences ont été organisées en 2019.

La première, intitulée « La mission Microscope : à la recherche du Principe d'Équivalence, lumière sur un système de propulsion atypique » présentée par Thomas Liénart (CNES) montre les challenges auxquels la propulsion doit faire face pour répondre aux missions scientifiques dans l'espace. Ici, la difficulté réside dans l'infinitésimal tout en y couvrant une large plage : de  $1 \mu\text{N}$  à  $500 \mu\text{N}$ , afin de compenser le frottement atmosphérique résiduel à 750 km d'altitude, ainsi que la pression de radiation solaire. Lors d'une première analyse, ce système a permis d'atteindre une précision de 10-14 sur ce principe d'équivalence entre la masse inertielle et la masse pesante.



1 – 500 µN



Illustration de l'échelle typique pour ce type de propulseur à gaz froid de très petite poussée

La seconde intitulée « Les instabilités de combustion, enjeux pour l'aéronautique et le spatial » était présentée par Luc-Henry Dorey (ONERA), Sébastien Ducruix (EM2C) et Laurent Selle (IMFT). Alors que les instabilités de combustion restent un risque majeur lors du développement d'un nouveau système de propulsion, cette présentation a permis de mettre en évidence les progrès incontestables réalisés au niveau académique à la fois dans le domaine de la compréhension des phénomènes physiques grâce à des expérimentations telles que la chambre MICCA (EM2C) ou le banc de combustion MASCOTTE (ONERA/EM2C) et dans le domaine des outils de simulation (CEDRE, AVBP/AVSP). Ces derniers sont désormais utilisés pour anticiper le comportement des foyers industriels.

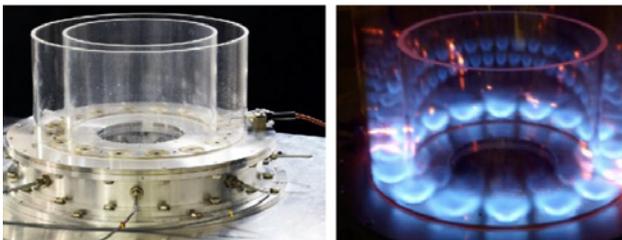


Illustration extraite de la conférence du soir « Les instabilités de combustion, enjeux pour l'aéronautique et le spatial » du 22 Mai 2019

La troisième relative à « La propulsion hybride des hélicoptères » présentée par Philippe Lagarde (Safran) a mis en évidence l'intérêt et les limites de l'utilisation de l'électricité dans le domaine de la propulsion. Si l'évolution de la technologie des batteries ne permet pas d'envisager une propulsion 100% électrique dans un avenir prévisible, l'optimisation des turbines à gaz combinée à l'hybridation électrique et à l'utilisation de carburants nouveaux conduiront à une réduction significative de l'empreinte environnementale des hélicoptères.



Illustration extraite de la conférence du soir « La propulsion hybride des hélicoptères » du 5 Novembre 2019

Ces conférences ont été suspendues en 2020 pour cause de COVID-19 ; elles devraient reprendre rapidement dès que les conditions sanitaires le permettront. La propulsion plasmique et les nouveaux enjeux auxquels doivent faire face les futurs groupes auxiliaires de puissance (APU) feront partie des thématiques prochainement considérées. ■

# L'Oiseau blanc... premier aéronef à avoir traversé l'Atlantique d'est en ouest les 8 et 9 Mai 1927

Par Bernard Decré, Président de l'Association La Recherche de l'Oiseau Blanc, Membre de la Commission 3AF Histoire.

Nous sommes en 1927, plus exactement le 8 mai 1927, au Bourget. L'As de l'aviation Charles Nungesser, troisième As après Fonck et Guynemer, se prépare à une grande première avec son camarade François Coli, ils vont tenter la première liaison Paris-New York non-stop !

A cet effet, Nungesser avait convaincu le constructeur d'avions Levasseur et le motoriste Lorraine Dietrich de réaliser un biplan pouvant accueillir dans ses réservoirs 4000 litres d'essence, correspondant à environ 40 heures de vol !

Cet avion, le PL8, s'inspire du PL4 en service dans la Marine, dont il reprend le moteur 12 Eb de 450 ch et aussi du PL7, dont le prototype a volé en 1926.

La particularité de ces avions, destinés à la Marine, est d'avoir une capacité d'amerrissage et de flottabilité en cas de problème technique. Le PL 4 a même un dispositif de largage du train avant, pour faciliter la manœuvre. Cette disposition sera reprise sur « l'Oiseau blanc ».

Un prix de 25 000\$ or, dénommé Prix Orteig du nom d'un célèbre hôtelier de New York, était la prime offerte au premier aéronef réussissant à faire New York-Paris ou Paris-New York...mais nos amis ne s'y sont pas immédiatement inscrits. Plusieurs équipages s'inscrivirent, surtout partant de New York, bénéficiant des vents favorables Ouest Est.

Nungesser était très connu aux États-Unis où il fit une tournée d'une cinquantaine de simulations de combat avec un vrai cirque aérien de quatre à cinq avions, des tirs de balles à blanc, des fumigènes, des figures d'acrobaties à couper le souffle. Ces démonstrations lui valurent une fabuleuse réputation. Il tourna également son propre rôle dans un grand film : The Sky Raider qui obtint un beau succès. Il a épousé à Paris une belle et riche américaine Consuelo Hatmaker, la fille du secrétaire particulier de Vanderbilt le magnat de l'acier.

Elle demandera à son mari de venir s'installer aux États-Unis et d'y accepter la nationalité américaine qu'on lui offrait ! Il déclina cette offre car sa maman

vivait seule boulevard de la République à Paris et son bon sens le fit revenir en France. On lui proposa aussi de copiloter un avion américain, offre qu'il déclina. Après des années d'aventure, de meetings et de vie fastueuse, mais coûteuse, avec son hôtel particulier en bas des Champs-Élysées, sa Rolls et tout le train de vie allant autour, devant « réduire la voilure », et penser à autre chose (il avait bien créé une école de pilotage à Orly, mais elle ne fit qu'aggraver ses finances), il fut alors attentif à tout exploit aérien à monter. Le prix Orteig, la première liaison Paris-New York le tentant, il commença à faire la tournée des constructeurs français capables de lui prêter une machine en mesure de réussir ce grand saut sur l'Atlantique.

À l'époque, des grands raids ont eu lieu, mais au-dessus de la terre ; en cas de panne, on pouvait toujours se poser sans grand risque. Des distances de plus de 4000 km furent franchies, des records ! Mais au-dessus de l'eau une panne pouvait être fatale ! Les moteurs pouvant tourner une quarantaine d'heures existaient, les structures, fuselage, ailes, existaient ; mais le premier risque résidait dans le décollage ! En effet, il fallait au moins 4000 litres d'essence pour cet aéronef qui allait peser plus de cinq tonnes, et qui serait supporté par un train d'atterrissage (ou de décollage) qui en outre subirait les petits défauts de la piste à « grande vitesse ». Le premier des risques serait donc la résistance du train et des pneus au décollage.

Certains concurrents en firent les frais et hélas plusieurs pilotes y laissèrent leur vie. Charles Nungesser conscient de cette première difficulté se refusa à effectuer des essais à charge maximale ; le véritable décollage suffirait. Comme le disait Nungesser : « si nous réussissons à décoller, à passer La Morée (le petit ruisseau en bout de piste au Bourget), nous réussirons notre tentative ! »

Le 8 mai 1927 à 5 heures du matin au Bourget, on sortit du hangar le biplan l'Oiseau blanc, tout blanc, les cocardes bleu blanc rouge sur les ailes et les couleurs nationales sur le gouvernail, comme on le faisait pour les avions militaires. Pour agrémenter le tout, Nungesser avait souhaité faire peindre son célèbre insigne de 14-18 : un cœur noir, avec un crane, deux tibia et un cercueil. Un peu

## HISTOIRE

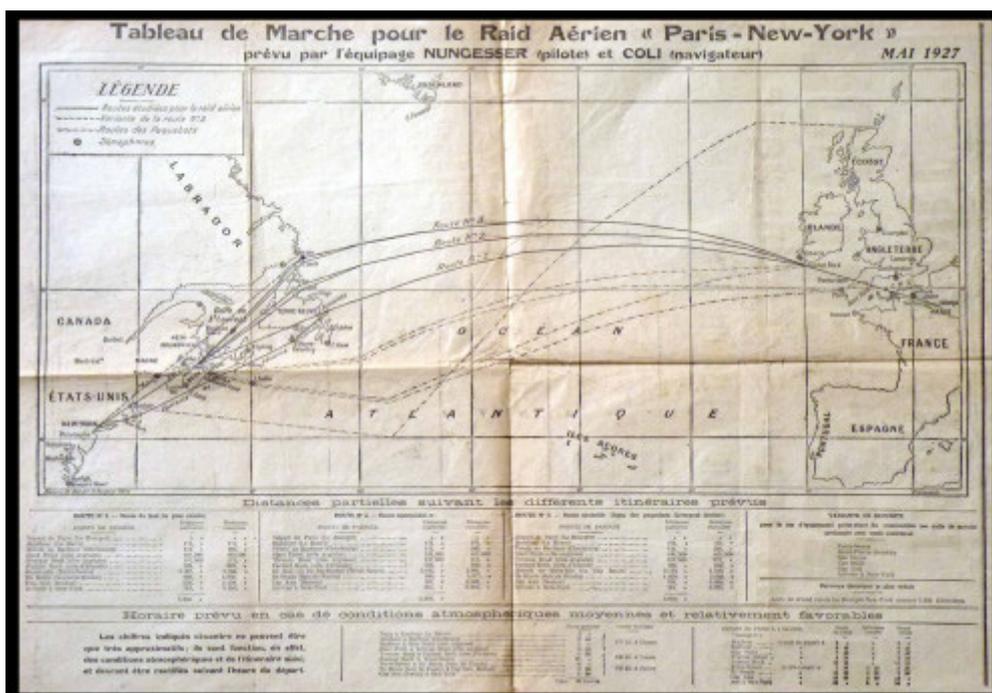
### L'OISEAU BLANC... PREMIER AÉRONEF À AVOIR TRAVERSÉ L'ATLANTIQUE D'EST EN OUEST LES 8 ET 9 MAI 1927

provocateur, il avait adopté cet insigne personnel, après un coup d'éclat – la capture, alors qu'il était hussard, d'une voiture Mors de l'état-major allemand – On le surnomma « le hussard de la Mort », qu'il transforma vite en « hussard de la mort » avec l'insigne adapté ! François Coli avait dû renoncer à son propre projet de traversée et fut contacté par Charles Nungesser qui lui proposa d'être son navigateur. Coli était aussi un excellent pilote.

L'équipage avait peu dormi sur leurs lits de camp dans le hangar près de leur avion. Malgré tout, une bonne centaine de personnes étaient là. Beaucoup sortaient de souper à Paris et étaient même venues en tenue de soirée ; des personnalités hommes politiques et artistes étaient là aussi, ayant été prévenues du départ imminent. Il faisait frais, à la limite d'un grain menaçant...au loin des éclairs dans l'Est. Charles Nungesser et François Coli avaient revêtu leurs combinaisons jaunes et leurs casques en cuir. Le moteur Lorraine Dietrich se mit à tourner vers 5h10. À 5h20 ils décidèrent de partir, l'Oiseau blanc mis les gaz pour ce sprint décisif. Il roula plus de 45 secondes, puis après un ou deux rebonds, il décolla, le train de décollage avait tenu. Nungesser fit grimper lentement l'Oiseau blanc, puis largua son train d'atterrissage près de huit à dix minutes après sa mise en route. Il tomba dans un champ près du Bourget et fut récupéré. Il est aujourd'hui au musée de l'Air et de l'Espace.

L'Oiseau Blanc rejoignit lentement les boucles de la Seine, sa vitesse devait être de 130 à 140 km/h, encore très lourd, mais tout allait bien. Son altitude : environ 3 à 400m. Il était accompagné par deux autres appareils : l'un du constructeur Levasseur, l'autre affrété par des journalistes. Le ciel était encombré de masses nuageuses. L'Oiseau blanc quitta la France au niveau de Fécamp, le moteur tournait à merveille, déjà l'avion s'était allégé, et il se dirigeait vers l'Angleterre entre deux bancs de brume. Officiellement les autorités françaises ne les virent plus après Fécamp : ils avaient déjà « disparus ». Une patrouille de l'aéronavale basée à Cherbourg devait les retrouver, mais ils ne se rencontrèrent pas. Par contre un marin de faction dans le kiosque d'un sous-marin britannique, le H50, qui était au mouillage à l'île de White, aperçu l'appareil vers 11 heures, et averti ses chefs. L'Oiseau blanc se dirigeait vers le nord-ouest. D'autres témoins, dignes de foi, le virent passer en Écosse et sur l'Irlande : tout allait bien.

L'Oiseau blanc attaqua alors sa grande traversée, le temps était clément, le vent d'Est était favorable à sa marche à 170-180 km/h, ils volaient entre 500 et 900 m, dans de bonnes conditions, vent arrière. Plus haut il faisait trop froid et tout allait bien à cette altitude. Coli, le navigateur, était plongé sur ses cartes ; leur hypothèse étant toujours de viser l'entrée est du Saint-Laurent, et le grand phare de Belle Isle facilement reconnaissable.



Trajet de l'Oiseau blanc [1]

## L'OISEAU BLANC... PREMIER AÉRONEF À AVOIR TRAVERSÉ L'ATLANTIQUE D'EST EN OUEST LES 8 ET 9 MAI 1927

Au départ du Bourget l'équipage savait qu'une dépression était établie sur Terre-Neuve, mais ils pensaient qu'elle serait en partie moins active et qu'ils « verraient sur place ». Avant cette confrontation météorologique, la nuit était déjà tombée ; ils survolèrent un paquebot de croisière français le Paris qui faisait route vers New York, à quelques centaines de kilomètres à l'est de Terre-Neuve. Les passagers avertis virent une petite lumière les doubler dans la nuit : l'Oiseau blanc se dirigeait vers l'embouchure nord-est du Saint-Laurent.

En s'approchant du nord de Terre-Neuve, le mauvais temps avec ses nuages épais, la pluie, la grêle, a, peut-être empêché l'Oiseau blanc de s'approcher du phare de Belle Isle, à l'embouchure est du Saint-Laurent, où le relief frise les huit cents mètres.

Ils auraient décidé alors de changer leur route, et de passer par le sud. Pour cela ils auraient longé la côte est de Terre-Neuve, conscients de la route et des heures de navigation, dans du très mauvais temps, et n'autorisant plus leur arrivée à New York faute d'essence. Ils avaient dû voler au raz de l'eau, à leur droite les côtes de Terre-Neuve, en-dessous le blanc de l'écume sur les brisants était bien visible. Leur nouvel objectif : un amerrissage à Saint-Pierre-et-Miquelon, îles Françaises, et tout de même la satisfaction d'avoir réussi cette première traversée est-ouest de l'Atlantique : une grande première !

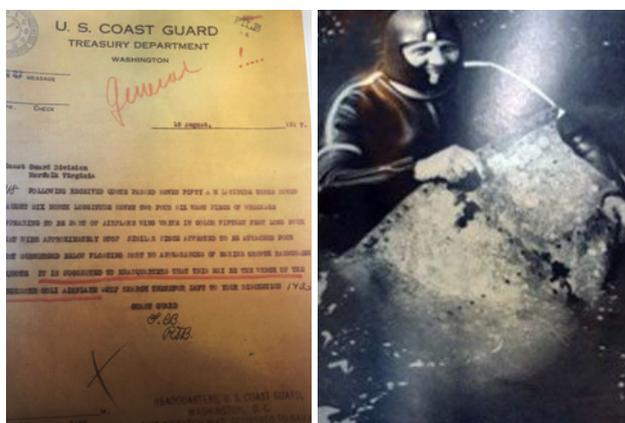
Ils auraient été vus à l'est de Terre-Neuve, à Harbour Grace, vers 9h locale : des témoins d'origine diverse déposèrent devant le juge et notamment la brave campagnarde qui décrivit un avion comme deux mouettes l'une au-dessus de l'autre (une certaine définition du biplan), Tous décrivent un avion blanc, sans train d'atterrissage. Les aviateurs auraient décidé de descendre le long de la côte est, échappant aux trop mauvais nuages de cette importante perturbation et trouvant entre des nuages plus calmes leur route vers la pointe sud de Terre-Neuve : vers le phare de Cap Race. L'Oiseau blanc survola une goélette la Belle Plaine ; il lui tourna autour pour bien se faire reconnaître et fit de même avec le navire l'Armistice. L'Oiseau blanc n'avait pas de radio au départ, trop lourd !

Un peu plus loin, ils virent sans doute un navire militaire gris, de 70 m environ, le Modoc, un garde côte américain de l'US Patrol, surveillant la route des icebergs.

Et puis, on ne les vit jamais plus...



Le garde-côte américain Modoc



Morceau d'avion blanc trouvé au large de Portland (Maine) en 1947 ? [3]

### Nos 15 ans de recherche ... et l'aventure continue

Ce n'est qu'après ces quinze années d'enquête que nous nous permettons de vous livrer les résultats de ces recherches faites par un simple passionné de navigation. Roland Nungesser, neveu de Charles, avait demandé au ministère des Transports une enquête qui fut menée par l'ingénieur général Meunier de la DGAC ; son rapport m'a aidé énormément. Enfin, La FAI (Fédération aéronautique internationale), dont le siège est à Lausanne, après lecture de notre dossier et après m'avoir entendu, m'a remis le prestigieux trophée Tissandier, lors de leurs 109èmes assises à Rotterdam devant les représentants de 35 pays Aéronautiques. Nous venons également de faire changer les plaques de rue Nungesser et Coli, dans 77 villes de France. Il n'y aura plus marqué « perdu en mer », mais « Traversée de l'Atlantique 8 et 9 mai 1927 ». Avenue Kléber, à 300 mètres de l'Arc de triomphe, et de la tombe du Soldat inconnu, l'Oiseau blanc, reconstitué au 8/10, est sur le roof-top du palace Le Peninsula, grâce à un très

## HISTOIRE

### L'OISEAU BLANC... PREMIER AÉRONEF À AVOIR TRAVERSÉ L'ATLANTIQUE D'EST EN OUEST LES 8 ET 9 MAI 1927

grand passionné d'aviation vivant à Hong Kong et qui suivait nos travaux. Il a décidé de nommer son extraordinaire restaurant l'Oiseau blanc en hommage à nos deux aviateurs méconnus. Ce grand passionné : the Honorable Sir Michael Kaddorie a fait là un beau cadeau à l'histoire de l'aviation, à Paris, à notre Pays !



Réplique de l'Oiseau blanc sur le roof-top du Peninsula

Nous avons eu une très large diffusion de nos recherches grâce entre autres aux quatre sujets de 30 minutes diffusés lors des rendez-vous de midi trente le dimanche, animés par Laurent Delahousse sur France 2 et à la journaliste d'investigation Marie-Pierre Farkas et son cameraman Jean-Marie Lequertier. Et aussi sur TV5 Monde, LCI, ARTE, TF1, FR3, etc. Nous avons avec notre ami Vincent Mongaillard, journaliste au Parisien, essayé de résumer ces recherches dans un livre publié chez Arthaud Flammarion : L'Oiseau blanc, l'enquête vérité.



Notre équipe de recherche à Saint-Pierre et Miquelon

Nos recherches ne sont pas totalement terminées ; il nous faut aller fouiller une petite zone au large de Portland Maine, près de Jewells et Cliff Islands, ou un pêcheur de homards Mr Mac Vane aurait relevé dans les années 60, dans sa ligne de casiers à homards, des morceaux d'avion blanc avec des rivets en cm et non en

inch ! J'ai eu la chance de le rencontrer, ainsi que son épouse, en 2015. Ils sont maintenant tous les deux au ciel. Mais ils ont eu le temps de me donner une carte marine avec la dernière zone à fouiller.

Comme quoi, quand on est passionné et têtue, on peut avancer et rectifier cette très belle page sur nos héros de l'aviation.

Pour tout cela il m'a fallu constituer une petite équipe : Pierre Le Normand, un grand marin, également pilote, et sachant tout faire, nos ingénieurs Hervé Blanchet et Sébastien Goguet spécialistes en sonar et magnéto-mètre. Trouver des partenaires efficaces : je tiens spécialement à remercier Jean-Paul Herteman, alors président du groupe Safran, les autorités de Saint-Pierre-et-Miquelon, la ville de Boulogne-Billancourt, l'Aéroclub de France, nos fidèles adhérents à l'Association La recherche de l'Oiseau blanc »

Mais cela n'est pas tout à fait terminé : je me dois de trouver environ 150 000 € pour faire cette dernière expédition, Trois semaines sur place, louer une vedette bien équipée, avec deux marins, deux spécialistes en ROV sous-marin avec leurs matériels pour fouiller une zone d'un mille de long, un demi mille de large et 35 m de fonds.

#### Références bibliographiques :

- [1] Clément-Pascal Meunier, ingénieur général de l'aviation civile *Nungesser et Coli disparaissent à bord de l'oiseau blanc, mai 1927*, rapport DGAC de septembre 1984.
- [2] Decré Bernard et Mongaillard Vincent *L'Oiseau blanc, l'enquête vérité, Nungesser et Coli, premiers vainqueurs de l'Atlantique*, édition ARTAUD 2014.
- [3] Rowe Snow Edward *Stores and shipwrecks of New England*



# La coopération spatiale franco-indienne

par Mathieu Weiss, Dominique Valentian, Noël Marchal et Selma Cherchali, Commission Transport spatial 3AF

*Première partie : FRANCE-INDE Une histoire fraternelle par Mathieu Weiss, correspondant du CNES à Bangalore*

L'année 2014 a marqué les cinquante ans de coopération spatiale entre l'Inde et la France. Elle constitue la plus ancienne et la plus importante des collaborations conduites par l'Inde avec un pays européen. L'agence spatiale indienne représente en volume le deuxième partenaire du CNES, après la NASA.

L'observateur occidental situe généralement l'Inde parmi les acteurs récents du secteur spatial, à tort. L'Inde est devenue, dès 1963, le deuxième partenaire international du CNES après les États-Unis. Les échanges engagés au début des années 1960 entre ce qui allait devenir l'agence spatiale indienne (ISRO) et le tout jeune CNES ont posé les premiers jalons d'une fraternité discrète mais continuellement entretenue entre les deux agences spatiales. Ce partenariat pour et par l'espace a souvent servi de poste avancé, nourrissant de son exemple chaque rencontre bilatérale, chaque sommet, chaque réunion du partenariat stratégique franco-indien. Même pendant les phases les plus tendues de l'embarco américain, alors que les autres Européens s'alignaient, la France ne reniera jamais son affection pour le sous-continent. Ces épisodes restent profondément ancrés dans la mémoire collective indienne. C'est cette confiance démontrée, éprouvée, qui sous-tend chacun de nos échanges bilatéraux, notamment dans le domaine spatial.

## AU COMMENCEMENT ÉTAIENT LES FUSÉES SONDES

Le premier accord de coopération spatiale franco-indien remonte à mai 1964. Il porte sur l'attribution des licences pour la construction en Inde des fusées sondes Bélier et Centaure de Sud-Aviation, et, partant, sur le transfert des techniques de propulsion solide. Sous le patronage des Nations unies et sous l'égide d'une équipe CNES dirigée par Jacques Blamont, ce sont au total une cinquantaine de fusées françaises construites localement qui décolleront à partir de 1965 du site de lancement équatorial de Thumba, dans l'État du Kerala. Le tout premier lancement depuis le territoire indien avait été effectué par la NASA en 1963.

La fusée-sonde Nike-Apache embarquait déjà une charge utile française. À Thumba, le transport des éléments des Centaures vers l'église du village, qui servait de bâtiment d'assemblage, se faisait sur des bicyclettes. La grande part des équipements techniques du site de lancement était fournie par le CNES. Cette épopée fut immortalisée par Henri Cartier-Bresson lors de son voyage en Inde en 1966. Quelques années plus tard, c'est à partir de cette technologie française que l'Inde développera sa toute première fusée, Rohini. La France ira jusqu'à dupliquer ses propres structures et bâtiments sous les cocotiers du Kerala, donnant naissance au Centre technique de Trivandrum. Désormais Vikram Sarabhai Space Center, ces infrastructures restent au cœur même du dispositif de l'ISRO. C'est un ingénieur issu de ce centre qui vient d'être appelé à diriger le bureau parisien de l'ISRO.

En 1971, l'Inde lance de grands travaux pour installer sur la côte Est, à Sriharikota, un site de lancement pour sa future famille de lanceurs spatiaux. À la demande de son partenaire du bout du monde, le CNES fournit l'expertise technique nécessaire, et aujourd'hui encore SHAR (Sriharikota High Altitude Range) compte avec le Centre spatial guyanais parmi les infrastructures de lancement les plus modernes au monde. Les années 1970, avec les transferts de technologie du programme Diamant puis d'Ariane, resteront dans les esprits comme l'âge d'or du partenariat spatial franco-indien. Les premiers ingénieurs indiens arrivés en France se sont formés aux technologies du lanceur Diamant au centre technique de Brétigny, au sein de la division Lanceurs du CNES. Peu après, ce ne sont pas moins de 40 ingénieurs indiens triés sur le volet qui s'installeront en famille à Vernon. Les échanges se font autant le week-end autour des spécialités culinaires respectives des épouses et à travers les amitiés nouées par les jeunes enfants que la semaine, où l'on travaille avec les équipes de la SEP à la motorisation liquide d'Ariane destinée à être adaptée au lanceur indien, lui aussi en développement. Les licences du moteur Viking sont transférées en 1972. Les échanges dans le domaine des lanceurs se poursuivent jusque dans les années 1980. Certains ingénieurs indiens participeront au développement du moteur cryotechnique HM7B. Ils s'en souviendront lorsque, de retour au pays, l'accès de l'ISRO à la propulsion cryotechnique leur donnera du fil à retordre quelques dizaines d'années plus tard.

## HISTOIRE

### LA COOPÉRATION SPATIALE FRANCO-INDIENNE

Quant au moteur Viking, adapté sous la dénomination Vikas, il constitue toujours le cœur de la production de Godrej Aerospace, à Mumbai, et équipe toute la gamme des lanceurs indiens, offrant une sorte de seconde vie à Ariane 4. Au-delà même de la propulsion, les ingénieurs du PSLV n'ont jamais fait mystère de leur source d'inspiration. Même les chiffres de fiabilité, devenus au fil des années aussi époustouflants que ceux de sa cousine, confirment l'air de famille entre PSLV et Ariane 4.

Dans le même temps, l'Inde s'est rapprochée politiquement de l'URSS. Les Russes resteront aussi fidèles au sous-continent que les Français. Et jusqu'à tout récemment la politique internationale de l'ISRO se lisait à travers le double prisme du grand frère russe et de la grande sœur française. Quand, dans les années 1990, les États-Unis, sous couvert de non-prolifération, déniaient à l'Inde le droit d'accéder à la technologie cryotechnique, les négociations entamées avec la Snecma, partenaire historique et naturel, achoppent. L'Inde fait alors le choix de la Russie, qui promet un transfert de technologie à un coût défiant toute concurrence. La technologie ne sera jamais transférée et la plupart des modèles de vol livrés sur étagère se révéleront défectueux. L'Inde s'en mordra les doigts pendant trente ans. Au-delà de la perte de confiance, cet échec aura conduit au développement local de la technologie cryotechnique. Le premier moteur indien de ce type finira par voler en janvier 2014.

#### ET LES SATELLITES ...

Une photographie officielle de l'ISRO montre le transport vers l'aéroport du premier satellite de communication indien, Apple (Ariane Passenger Payload Experiment), destiné à être acheminé au CSG pour son lancement par Ariane 1 en juin 1981. On y voit le satellite à l'air libre sous une tente de fortune, arrimé à un char à bœufs, entouré de ses concepteurs qui tentent de le protéger de la poussière tant bien que mal. Depuis cette première expérience, d'Ariane 1 à Ariane 5, l'Inde n'aura cessé de choisir le lanceur européen à chaque fois que ses satellites s'avèreront trop lourds pour ses propres fusées. Dix-huit gros satellites des séries INSAT et GSAT satellites ont été lancés depuis Kourou. De même, les derniers satellites de la famille SPOT ont été lancés par PSLV – SPOT 6 en 2012, SPOT 7 en 2014.

De fructueuses coopérations sur les enjeux climatiques et l'environnement se sont également développés entre les deux pays. Les objectifs scientifiques de ces partenariats sont détaillés dans l'article ci-après.



*Transport vers l'aéroport du premier satellite de communication indien*

Enfin, les ambitions de l'Inde dans le domaine des vols habités ont fait récemment l'objet de coopérations avec la France. Un article complet sur le sujet paraîtra dans une prochaine gazette.

Souhaitons que l'aventure de cette originale et féconde coopération, de plus de 55 ans, se poursuive !!

*Deuxième partie : Coopération SEP/ ISRO sur les lanceurs par Dominique Valentian et Noël Marchal*

#### LA PROPULSION SOLIDE :

Au quatrième trimestre 1973, SEP et le DOS (Department Of Space Indien) signent un accord de coopération dans le domaine des essais de propulseurs à propergols solides. Cet accord est signé au siège de SEP (voir Figure 1)



*De gauche à droite : MM. Soufflet, (PDG de SEP), Morin, Seshan, Muthu-Nayagam (ISRO), Caquet*

#### LE MOTEUR VIKAS

Le Vikas agreement est signé le 9 août 1974 (Vikas signifie «illumination» en sanscrit). Il couvre la cession par la SEP de la licence de fabrication du moteur Viking

et de capteurs de pression (21 T), ainsi que le transfert de technologie associé. La SEP doit également fournir à l'ISRO toute la documentation technique sur le moteur Viking pendant 5 ans ou jusqu'au premier vol Ariane 1. Comme il s'agit de «troc» inter-états, la contrepartie pour l'Inde sera de produire une grande partie des capteurs pour le programme Ariane et d'envoyer à Vernon une équipe d'ingénieurs pour participer au programme de développement des étages stockables (L140 et L33). L'essentiel des personnels de l'ISRO arrivent à Vernon en 1975, avec leurs familles et ils seront logés à la résidence de la Tourelle à Saint Marcel. Plus de vingt ingénieurs sont répartis au sein des équipes techniques de conception du VIKING, mais aussi aux départements chargés du programme, de la qualité, de la fabrication et aux essais. Il y a par exemple trois ingénieurs de l'ISRO intégrés à l'équipe moteur Viking. Les premiers repartiront fin 1978 et les derniers en 1980. La SEP fournira également la configuration du Viking Ariane 1 après LO2 (modifications de l'injecteur).



*Préparation d'une conférence de presse*

En 1984, pendant le développement Ariane 4, l'ISRO sollicite la SEP pour tester ses deux premiers prototypes de moteur Vikas. Comme les moyens d'essais sont propriété de l'ESA, il est nécessaire de disposer d'un accord de l'agence et du CNES pour les utiliser en dehors du programme Ariane. Le CNES donne son accord sous réserve d'une confiance suffisante sur la qualité du matériel.

SEP va organiser une revue à Trivandrum et chez les industriels qui se tiendra en deux étapes : au printemps 1985 pour évaluer le générateur et la turbopompe, suivie d'un comité directeur avant de donner un feu vert aux essais de sous ensemble. À l'été 1985, les essais de générateur de gaz seront effectués sur le banc PF1 de Vernon, suivis par les essais de turbopompes sur le PF2.

Une deuxième revue du moteur complet est effectuée par la suite et les deux moteurs Vikas seront testés à la fin de 1985. La SEP met également à disposition ses moyens de démontage et de décontamination.



*Le moteur Vikas*



*Les équipes d'essai au pied du PF2*

En 1992, après la guerre du Golfe, les services secrets américains surprendront un essai de missile équipé d'un moteur Vikas. L'un des directeurs SEP devra alors s'expliquer devant la commission du SGDN (Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale). Cet incident conduira à ne plus pouvoir communiquer avec nos homologues de l'ISRO.

## HISTOIRE LA COOPÉRATION SPATIALE FRANCO-INDIENNE

Cependant l'Inde poursuit son programme spatial, le 20 septembre 1993 a lieu le premier lancement d'un PSLV (*Polar Satellite Launch System*), utilisant un moteur Vikas adapté au fonctionnement sous vide pour le deuxième étage (tuyère plus longue et galbée). Ce premier lancement sera un échec, mais le second le 15 octobre 1994 sera un succès. Jusqu'en 2019, l'ISRO a lancé 50 PSLV avec deux échecs.

Le GSLV Mk 2 (*Geostationary Satellite Launch Vehicle*) reprend le propulseur central à poudre du PSLV, le deuxième étage étant équipé d'un Vikas, et se voit adjoindre quatre propulseurs d'appoint à liquide (L40) équipés d'un moteur Vikas et un étage supérieur cryotechnique (H13) équipé d'un moteur Russe, le KDV1 de 74 kN de poussée, qui sera ensuite «indianisé» (moteur CUS). La performance GTO est de 2200 kg, relativement faible, d'une part à cause de la latitude de la base de lancement de Shriharikota (proche de Madras et donc loin de l'équateur) et de la période de fonctionnement des boosters à liquide avec le corps central arrêté qui conduit à «trainer» une masse inerte pendant environ 50 s. L'ISRO a introduit sur les Vikas des PAL et au deuxième étage les modifications de «type Ariane 3» : remplacement de l'UDMH par de l'UH25 et augmentation de la pression foyer à 58,5 bar. Le premier vol du GSLV (D1) a lieu le 18 avril 2001, et est un succès malgré un tir avorté.

Le 10 juillet 2006, le quatrième lancement d'un GSLV (F02) se solde par un échec. L'ISRO demande au CNES une assistance d'experts français pour participer à l'analyse des causes de cet échec. Une mission de deux spécialistes du CNES et d'un de Snecma Vernon se rend sur place du 18 au 25 juillet. Cette participation sera symbolique car les équipes de l'ISRO ont déjà identifié l'origine de l'échec : il s'agit du régulateur principal qui a dysfonctionné générant un excès de puissance turbine et une température trop élevée : la température à l'entrée de la turbine est de 1200°C (650°C nominale) et la pression chambre est de 71,5 bar (58,5 bar nominale). Après 4 secondes de fonctionnement dans ces conditions, le générateur ou le tore d'admission turbine se perce et le régime moteur tombe à zéro. L'anomalie n'a pas pu être détectée par le système de surveillance, car seuls sont contrôlés les sous régimes des moteurs Vikas. Le lanceur se désintègre sous l'effet des charges dynamiques après 60 secondes de vol. L'origine du dysfonctionnement de la régulation principale est un défaut de fabrication des régulateurs ergols (N&U) qui sont trop «passants» en butée fermée, engendrant un excès d'ergols au générateur d'où une sur-température et une surpuissance sur la

turbine.

Station de réception d'images SPOT et Landsat : SEP a aussi fourni l'une des premières stations de réception et de traitement d'images à l'Inde. Le contrat de fourniture a été signé en 1986 et les systèmes livrés en 1987.

Le CNES et la SEP ont su reconnaître dès les années 70 la qualité de l'engagement de l'Inde dans le domaine spatial. Cet engagement continue à porter ses fruits aujourd'hui.

*Troisième partie : Coopération CNES/ISRO dans le domaine de l'observation de la terre et du climat par Selma Cherchali – Responsable de Programme Sciences de la Terre au CNES Toulouse.*

### LA MISSION MEGHA-TROPIQUES

La mission Megha-Tropiques est une mission en coopération avec l'ISRO pour l'étude du cycle de l'eau et des transferts d'énergie entre océan et atmosphère, sur une orbite optimisée pour l'observation des régions intertropicales. Le satellite Megha-Tropiques a été lancé le 12 octobre 2011.

Basé sur une plate-forme indienne, le satellite a pour charge utile un ensemble de quatre instruments, dont trois instruments français :

- le radiomètre imageur micro-ondes Madras, dédié à l'étude des précipitations,
- le radiomètre sondeur micro-ondes Saphir, dédié à la mesure du profil vertical d'humidité,
- le radiomètre à bandes larges Scarab, pour la mesure du bilan radiatif au sommet de l'atmosphère.

Le quatrième instrument – indien – est un récepteur GPS (Rosa) fonctionnant en radio-occultation pour la fourniture de profils de température et d'humidité. À l'heure où ces lignes sont écrites, les instruments Saphir et Scarab continuent de fonctionner et de fournir des données précieuses.

Inclinée sur l'équateur à 20°, l'orbite (altitude 867 km) offre une revisite élevée permettant d'observer jusqu'à six fois par jour le même lieu à l'intérieur de la ceinture intertropicale, et d'échantillonner finement le cycle diurne de la vapeur d'eau, des nuages et des précipitations, et leurs effets radiatifs.

Au-delà des objectifs scientifiques initiaux, couvrant trois grands domaines de recherches : la relation entre nuages et vapeur d'eau, le cycle de vie des systèmes convectifs (orages tropicaux) et l'impact hydrologique des pluies (hydrométéorologie), l'utilisation des données Megha-Tropiques s'est progressivement imposée, depuis 2014, dans le domaine de la prévision météorologique opérationnelle (PNT). Grâce à la diffusion en temps réel des données par le CNES, l'ISRO et Eumetsat, huit centres de prévision météorologiques (Europe, États-Unis, Japon, Royaume-Uni) assimilent actuellement les données de l'instrument Saphir (mesures de la diffusion du rayonnement à 183 GHz).

Il est important enfin de noter les partenariats noués à l'international, notamment autour de la mission GPM consacrée à la mesure des précipitations à l'échelle globale. L'intégration de Megha-Tropiques à la mission GPM s'est faite, y compris par le développement de chaînes d'exploitation conçues de manière intégrée, et permettant l'utilisation mutualisée des données et leur combinaison. Depuis 2015, l'instrument Saphir, dont la stabilité radiométrique est excellente, sert d'étalon pour les sondes micro-ondes des satellites de la constellation GPM. Dans le domaine de l'hydrométéorologie, les produits Imerg (NASA/GPM) ou Tapeer (diffusé par le pôle Aeris) exploitent les données Saphir.

Un article dressant le bilan scientifique de la mission a été publié en novembre 2019 dans *La Météorologie*. Cet article est disponible sur le site Météo et Climat :

<http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/70557>

## LA MISSION SARAL/ALTIKA

Lancé le 25 février 2013, le satellite SARAL/AltiKa est une le fruit d'une collaboration entre la France et l'Inde dans le domaine de l'observation et la surveillance de l'environnement.

Sur une plate-forme développée par l'agence spatiale indienne, sont embarqués 2 instruments indépendants, ARGOS-3 et AltiKa :

- ARGOS-3 constitue le récepteur de 3e génération du système Argos qui permet de localiser et de collecter des données environnementales sur tout « objet » équipé d'un émetteur Argos : bouées dérivantes, tortues, oiseaux.
- AltiKa est une charge utile novatrice, développée par Thales Alenia Space pour le CNES, comprenant un altimètre, un radiomètre et un instrument de localisa-

tion DORIS. Elle permet de mesurer toutes les surfaces de l'hydrosphère (océan, lacs, fleuves, glaces) en utilisant une fréquence d'ondes électromagnétiques très élevée : la bande Ka (autour de 35,75 GHz contre 13,6 GHz auparavant).

Installé pendant ses 3 premières années sur l'orbite historique du satellite ENVISAT (polaire à 800 km d'altitude, quasi polaire (l'inclinaison finale atteinte est de 98,527°), synchrone solaire et avec un cycle de répétition de 35 jours), le satellite SARAL/AltiKa a ensuite commencé une nouvelle phase (orbite dérivante) en juillet 2016 suite à une anomalie de bord sans impact sur la qualité des données science. Une nouvelle extension de mission jusqu'à fin 2021 a été récemment décidée permettant aux scientifiques du monde entier d'accéder aux données science de SARAL/AltiKa à forte valeur ajoutée.

En effet, SARAL/AltiKa qui a le seul altimètre en vol en bande Ka, offre une meilleure résolution au sol permettant de s'approcher plus près du littoral ou d'avoir accès aux fleuves et lacs sur les continents et pénètre moins profondément dans la neige ou la glace permettant ainsi de collecter des informations de hauteur sur ces surfaces. Ainsi, en plus de contribuer à l'observation de la circulation océanique de type méso-échelle (entre 50 et 500 km), qui est essentielle pour comprendre la dynamique de l'océan et ses impacts climatiques, SARAL/AltiKa s'est également avéré être une excellente opportunité pour les communautés des glaciologues, des hydrologues et ceux intéressés par la géodésie.

SARAL/AltiKa permet la poursuite des longues séries de données temporelles nécessaires à l'étude du changement climatique. Les données SARAL/AltiKa contribuent également à l'océanographie opérationnelle et sont assimilées quotidiennement par le Copernicus Marine Environment and Monitoring Service et les agences météorologiques française et européenne.

Enfin, il est important de noter qu'un projet initialement dédié à l'océanographie satellitaire comme SARAL/AltiKa ouvre la voie - grâce à la bande Ka - aux projets satellites non seulement en océanographie comme SWOT mais aussi en glaciologie (CRISTAL), et en hydrologie (SWOT, SMASH).

Pour en savoir plus, un article *The SARAL/AltiKa mission: A step forward to the future of altimetry* publié en 2020 est accessible par le lien suivant :

## HISTOIRE

### LA COOPÉRATION SPATIALE FRANCO-INDIENNE

[https://www.researchgate.net/publication/339012779\\_The\\_SARALAltiKa\\_mission\\_A\\_step\\_forward\\_to\\_the\\_future\\_of\\_altimetry](https://www.researchgate.net/publication/339012779_The_SARALAltiKa_mission_A_step_forward_to_the_future_of_altimetry)

Prévue pour un lancement en 2025, la mission TRISCHNA (*Thermal infraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assesment*) est une coopération entre les agences spatiales Française (CNES) et Indienne (ISRO). Elle est destinée à mesurer environ 2 fois par semaine le signal infra-rouge thermique du système surface-atmosphère pour tout le globe, à 57 m de résolution pour les continents et l'océan côtier, et une résolution de 1000 m sur le reste des surfaces océaniques.

Il est maintenant admis que sous les effets d'une pression anthropique et climatique croissante, on observe une transformation accélérée de l'environnement du vivant, qu'il s'agisse de nous humains, ou du reste de la biodiversité animale et végétale. Ces changements qui résultent d'interactions entre le climat, l'environnement et les grands cycles biogéochimiques (eau, énergie, carbone) sont très liés au fonctionnement de la végétation (évaporation, transpiration, photosynthèse) et à plus grande échelle aux circulations atmosphériques et océaniques, avec des rétroactions fortes et positives sur le climat de la Terre. Qu'elles soient liées à l'homme, ou au climat, ces modifications affectent particulièrement l'agriculture, l'aménagement des zones rurales, l'urbanisation et l'artificialisation, ainsi que l'hydrologie continentale et côtière.

Depuis l'échelle globale jusqu'à des échelles beaucoup plus régionales, auxquelles interviennent les décideurs et les gestionnaires, l'eau est à la fois un élément indispensable à la vie et le principal vecteur des échanges de chaleur dans la machine météorologique et climatique. Aujourd'hui, la modification conjuguée des températures et des régimes de précipitations induit une modification des réserves accessibles d'eau douce dont 70% sont consacrés aux usages agricoles (irrigation), 25% à l'industrie et le reste aux usages domestiques. Il est donc logique de rechercher une gestion optimisée de cette ressource, au travers d'une variable clé, l'évapotranspiration. Pour y accéder, la température de surface et sa dynamique sont des indicateurs précis de l'évaporation de l'eau des sols, de la transpiration des végétaux et du climat local.

Dans ce contexte, TRISCHNA et ses mesures fréquentes à haute résolution relèvent d'enjeux scientifiques, économiques et sociétaux majeurs au travers des 6 grands thèmes que la mission aborde sous l'angle de la recherche et du développement d'applications. Ces 6 grands thèmes sont :

1. la gestion des écosystèmes et la détection de stress hydrique afin notamment d'ajuster au mieux et le plus précocement possible les besoins pour l'irrigation;
2. le suivi des eaux côtières et intérieures;
3. l'urbanisation et les îlots de chaleur urbains;
4. l'atmosphère (aérosols, vapeur d'eau, nuages);
5. la cryosphère (ruissellement de la fonte des neiges);
6. la terre solide (volcanologie).

La mission TRISCHNA se concentrera en priorité sur l'estimation de l'évapotranspiration, et contribuera à la détection du stress hydrique afin notamment de mieux gérer l'irrigation. Elle fournira donc des informations directes sur l'utilisation de l'eau et en particulier la consommation agricole. Moins directement, ces données contribueront aussi aux inventaires d'eau disponible localement et elles permettront d'étudier les causes naturelles ou anthropiques des variations de niveau des eaux souterraines.

En effet, sans TRISCHNA, la communauté manque d'informations à l'échelle parcellaire avec une revisite temporelle suffisante pour évaluer le besoin en eau des cultures, celle-ci variant selon les assolements et les pratiques agricoles. Avec TRISCHNA, il est possible d'estimer cette consommation, voire de l'optimiser, en fournissant à l'agriculteur des données pour l'aider dans sa gestion de l'irrigation. En complément de l'observation optique, il sera possible de détecter d'éventuels stress hydriques dans la végétation et d'en déduire les pertes de rendement par modélisation. TRISCHNA peut donc être utilisé comme un outil d'alerte précoce pour prévenir les effets de la sécheresse sur les surfaces agricoles ou pour détecter les problèmes liés à la santé des systèmes forestiers ou des zones humides.

Grâce à la température de surface mesurée par TRISCHNA, les données collectées sur la dynamique de l'évapotranspiration deviendront plus précises. Dans la perspective d'une agriculture durable, elles permettront une gestion adaptée de la ressource hydrique disponible et elles aideront à définir de nouvelles pratiques agricoles face à la raréfaction de cette ressource.

TRISCHNA pourra aussi être utilisé comme un outil d'alerte précoce afin de prévenir et atténuer l'effet des sécheresses sur les surfaces agricoles ou pour veiller à la santé des écosystèmes agro-forestiers, ou d'autres écosystèmes comme les zones humides et les récifs coralliens.

Plus de détails sont présentés sur le site du CESBIO (Centre d'études spatiales de la Biosphère), Unité mixte de recherche (CNES/CNRS/IRD/Université de Toulouse, INRAE) qui héberge les principaux investigateurs de la mission (voir lien) :

<https://www.cesbio.cnrs.fr/la-recherche/activites/missions-spatiales/TRISCHNA/>

■

## HISTOIRE

# Les origines de l'aéronautique roumaine se retrouvent à Pau... depuis l'époque des pionniers, d'étroites relations avec la France

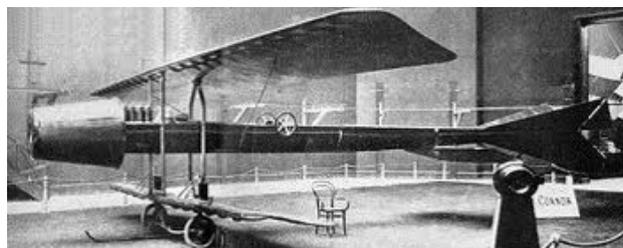
par Bernard Vivier, président du GR Pays de l'Adour

La Roumanie fait partie des pays qui ont contribué aux débuts de l'aviation avec, notamment, Trajan Vuia, qui réussit quelques envolées en 1907 avec des appareils de sa conception et qui sera ensuite suivi d'Aurel Vlaicu, qui volera en 1910 sur un appareil avec lequel il pourra prendre part à des manoeuvres militaires, fin 1910. Cet aviateur sera malheureusement victime d'un accident en 1913.



Trajan Vuia

Naturellement, pour les lecteurs français, le plus connu de ces pionniers roumains reste Henri Coanda, qui fera ses études à Paris et expérimentera à Issy-les-Moulineaux, en décembre 1910, son premier monoplan. S'associant avec Bristol, il livrera en Roumanie quelques appareils « Bristol-Coanda ».



Appareil Coanda (1910)

C'est cependant vers la France que la Roumanie se tournera alors pour commander, en 1915, les premiers avions destinés à équiper des escadrilles opérationnelles. Voisin LA, Caudron GIII, Farman HF 20, Blériot XI, puis Nieuport et Breguet de différents types, équiperont peu à peu l'armée roumaine qui se battait alors contre l'Allemagne.

Après la Première Guerre mondiale, c'est encore la France qui livrera des Spad XIII et des Breguet XIV. Appuyées par de solides relations avec l'industrie aéronautique française et par de nombreux ingénieurs formés en France, les autorités roumaines vont alors essayer de créer une industrie aéronautique, qui commencera, fort raisonnablement, ses activités avec des constructions sous licence.

C'est ainsi qu'est créée à Brasov, en 1925, l'entreprise Industria Aeronautică Română (IAR), avec des capitaux

## HISTOIRE

### LES ORIGINES DE L'AÉRONAUTIQUE ROUMAINE SE RETROUVENT À PAU... DEPUIS L'ÉPOQUE DES PIONNIERS, D'ÉTROITES RELATIONS AVEC LA FRANCE

français notamment apportés par Blériot, et Lorraine Dietrich. Des Morane-Saulnier MS 25 et des Potez 25 y seront fabriqués, de même que des moteurs Lorraine et Gnome-Rhône, les premières fabrications sortant d'usine en 1927.



*Essai hélice Ratier sur P. 25 à Brasov. Second à partir de la gauche, Lucien Virmoux*

Après la création, le directeur général, Ion Bastaki, s'était adjoint l'ingénieur Elie Carafoli, qui avait fait ses études à Paris et à l'Institut aérotechnique de St Cyr et qui fut placé à la tête du département « avions ».

L'histoire du premier avion de chasse roumain est... française!

Construire des avions sous licence est une chose. Concevoir un avion nouveau en est une autre... Elie Carafoli réussit à convaincre les autorités roumaines qu'IAR pouvait désormais tenter d'entreprendre ses propres développements. Mais manquaient cependant les connaissances et l'expérience pour se lancer seul dans cette aventure technique.

Par accord mutuel, un ingénieur français, Centralien, qui avait participé aux études des Wibault 210 et Spad 91, fut détaché par Blériot en Roumanie pour faire aboutir ce projet. C'est ainsi que Lucien Virmoux et sa famille arrivèrent en Roumanie fin 1927, dans la perspective d'un détachement qui devait durer quatre ans.

Lucien Virmoux se mit immédiatement au travail, à la société IAR, et secondé par Elie Carafoli, donna naissance au projet IAR CV-11 (pour Carafoli-Virmoux...). Un avion très élégant, monoplane, particulièrement moderne pour l'époque et dont les lignes, dessinées par Lucien Virmoux, étaient indiscutablement d'inspiration française, notamment avec un raccordement fuselage-dérive « à la Couzinet ».



*Structure fuselage du CV 11*



*Virmoux (à gauche) et E. Carafoli (au centre) avant le premier vol du CV 11*



*IAR CV11 à Brasov, avant le 1er vol*

Si le fuselage était en partie métallique, jusqu'à l'arrière du cockpit, le reste de la structure était en bois et entoilé, comme les ailes et les empennages. L'avion fut d'abord équipé d'un moteur Lorraine « Courlis » de 12 cylindres qui développait 600 ch

## LES ORIGINES DE L'AÉRONAUTIQUE ROUMAINE SE RETROUVENT À PAU... DEPUIS L'ÉPOQUE DES PIONNIERS, D'ÉTROITES RELATIONS AVEC LA FRANCE



Lorraine « Courlis » sur IAR CV 11

Le premier vol eut lieu en 1930 et l'appareil dépassa aisément la vitesse de 300 km/h.



IAR CV11 vu de face

Le moteur s'avérant un peu lourd pour la structure, il fut décidé d'équiper le second prototype en cours de finition par un Hispano-Suiza plus léger avec lequel l'avion montra de meilleures performances.

Dénoté « à la française » «IAR CV-11 C1» (pour avion de chasse monoplace), le prototype fut expédié en France, à Istres, en janvier 1931. Des essais de performance furent menés sur cette base au début de l'année 1931. Le chasseur y démontra ses capacités en atteignant 329 km/h à basse altitude. En essai d'interception, son pilote monta à 5000 m en 8 min, ce qui était alors au niveau des meilleurs standards.

Cependant, quand l'armée roumaine eut à choisir son nouveau chasseur, les membres de la commission de choix estimèrent risqué de passer trop rapidement à une production de série et décidèrent finalement l'acquisition d'un avion... polonais, moins moderne, le PZL P11 à voilure haute, principe dont beaucoup d'armées de l'air, non convaincues par les monoplans, restaient à l'époque encore artisanes.

Sans se démotiver, et devant les résultats particulièrement encourageants, Elie Carafoli décida de tenter de battre le record de vitesse en circuit fermé (base de 500 km) alors détenu par le français Sadi-Lecointe, sur Nieuport-Delage, avec 306,6 km/h.

Le 9 décembre 1931, le pilote Romeo Popescu décolla le CV-11 de l'aérodrome de Bucarest et commença sa course pendant une heure et demi avec une vitesse moyenne qui était voisine de 320 km/h. C'est alors que, brusquement confronté à un arrêt du moteur, le pilote tenta un atterrissage forcé sur une neige épaisse. Bloqué par son train, l'avion se retourna en tuant son pilote.

La collaboration de Lucien Virmoux avec IAR allait continuer un peu, comme l'atteste la photographie de l'ingénieur devant le prototype de l'IAR 13. À la demande d'Elie Carafoli, on tenta, en effet, de développer des versions dérivées du CV-11 d'origine. C'est ainsi que naquit en 1932, avec une aile nouvelle, l'IAR 12, doté également d'un empennage plus classique, mais reprenant une bonne part du travail initial de Lucien Virmoux. La même année fut aussi proposé l'IAR 13 de caractéristiques comparables...mais l'aile haute avait toujours ses partisans!



L'IAR 12



L'IAR 13

## HISTOIRE

### LES ORIGINES DE L'AÉRONAUTIQUE ROUMAINE SE RETROUVENT À PAU... DEPUIS L'ÉPOQUE DES PIONNIERS, D'ÉTROITES RELATIONS AVEC LA FRANCE

Ce sera finalement en 1933 que l'IAR 14, proposé comme avion d'entraînement, fut commandé par l'armée à une dizaine d'exemplaires, marquant le début de la production aéronautique nationale chez IAR, qui débouchera, quelques années plus tard, sur le chasseur IAR 80, mieux connu et utilisé pendant la Seconde Guerre mondiale.

Après-guerre, Carafoli, connu pour ses travaux en aérodynamique, fut élu à l'académie roumaine, puis devint président de la Fédération Aéronautique Internationale, de 1968 à 1970 !

Mais que devint Lucien Virmoux, qui fut à l'origine de la longue lignée des avions IAR?

Des Virmoux V1 et V2...aux autobus palois de la TPR

Déçu par les décisions roumaines et estimant avoir alors une certaine avance par rapport aux bureaux d'études des constructeurs français, Lucien Virmoux rentre en France fin 1932, en proposant au ministère de la Guerre un avion de chasse dérivé de ses travaux roumains. Ce sera le Virmoux V1. Ses performances calculées sont les suivantes :

- Vitesse à 4000 m de 400 km/h
- Vitesse au sol de 345 km/h

Le projet est estimé intéressant, mais la Direction Générale Technique estime, en décembre 1932, que les performances doivent se démarquer davantage de celles des avions alors en commande.

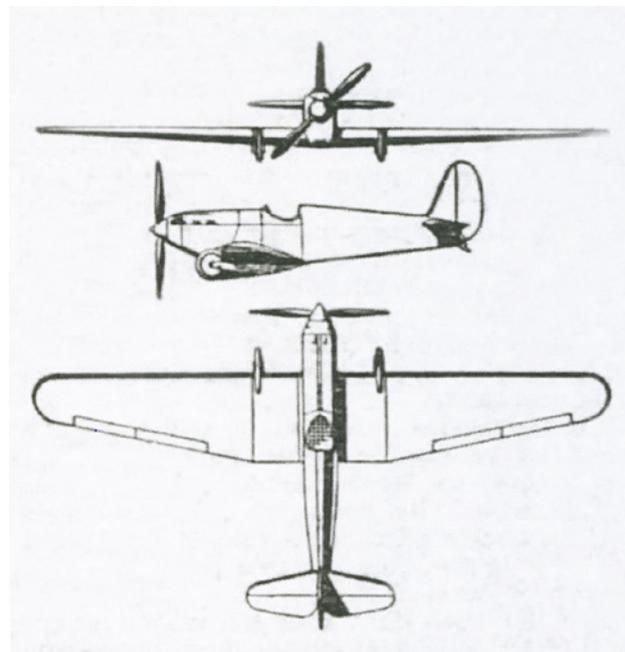
Lucien Virmoux, encouragé à améliorer son projet, se remet à l'ouvrage et travaille désormais sur le projet de Virmoux V2.

Les caractéristiques calculées du V2 apparaissent dans le journal « Les Ailes » en décembre 1934 et sont excellentes pour l'époque :

- Train escamotable
- Vitesse entre 440 et 470 km/h à 4500 m
- Plafond pratique: 12500 m
- Moteur Hispano-Suiza 12xcrs de 640 cv
- Temps de montée à 3500 m de 3 min 53 s et à 8000 m de 11 min

Avec l'appui du ministère, Caudron se déclare prêt à assurer la construction du prototype et Hispano-Suiza, à fournir le moteur. Le 24 octobre 1933, on passe à l'établissement des clauses techniques du marché et l'avant

projet de marché est reçu et signé par Lucien Virmoux en juin 1934.



Plan 3 vues du Virmoux V2

Et puis tout bascule. C'est à Pau, où Lucien Virmoux est venu, en août 1934, passer quelques jours de vacances dans sa belle-famille, que la nouvelle arrive: « un nouveau programme d'avions de chasse étant en cours d'établissement, il ne sera pas donné suite au projet du marché pour la fourniture d'un avion de chasse-canon Virmoux, cet appareil ne correspondant plus aux desiderata actuels ».

Profondément déçu par une décision qu'il n'attendait pas et dont les raisons lui échappent, Lucien Virmoux décide alors brusquement d'abandonner sa carrière aéronautique. Ne gardant de cette épopée que quelques photographies, une maquette et une coupure de presse, il s'engage dans une nouvelle carrière.

Un décret-loi du 9 avril 1934 avait institué la notion de «coordination Rail-Route» et mettait un terme à la liberté de transport public par car, alors très pratiqué par de nombreux petits opérateurs. En décidant d'organiser un regroupement, Lucien Virmoux, dont la famille proposait déjà du transport par autocar, créa la société «Transports Palois Réunis», dont il prit la direction.

## LES ORIGINES DE L'AÉRONAUTIQUE ROUMAINE SE RETROUVENT À PAU... DEPUIS L'ÉPOQUE DES PIONNIERS, D'ÉTROITES RELATIONS AVEC LA FRANCE



Un bus de la TPR

Lors de l'entrée en guerre, le matériel de la TPR fut réquisitionné, Lucien Virmoux étant, de son côté, mobilisé comme officier. Fait prisonnier lors de l'avance allemande, il prit, comme beaucoup, le chemin de la captivité, jusqu'à la fin de la guerre. C'est sous sa direction qu'à la libération, la TPR redémarra ses activités. Lucien Virmoux s'éteignit en 1987.

C'est ainsi que nous retrouvons à Pau, sur l'initiative de sa fille Janine, la partie française de l'histoire de la naissance d'une industrie aéronautique en Roumanie !

### *Epilogue: pour mieux comprendre*

Il est naturellement difficile, bien que tentant, d'essayer de comprendre les raisons qui conduisirent à l'arrêt du projet V2. L'auteur se permet de vous proposer, dans ces lignes, quelques éléments de réponse qui n'engagent que lui...

Compte tenu du contexte de l'époque, il est indéniable que plusieurs facteurs ont joué.

#### *1 - Les délais*

Entre la remise du projet de V1 et le projet de contrat du V2, 21 mois se sont écoulés. C'est assez long, si l'on considère que Lucien Virmoux ne part pas d'une page blanche et que les avions de chasse de l'époque ne sont pas particulièrement complexes. C'est d'autant plus vrai que la commande devait entraîner l'étude détaillée et que les travaux n'avaient certainement porté que sur un avant-projet. À l'allure qui était celle du progrès aéronautique à cette époque, la lenteur des services officiels a pu contribuer à amoindrir l'intérêt du projet, face à des industriels organisés.

#### *2 - Un ingénieur indépendant*

Si ce n'était pas un obstacle infranchissable (Joseph Szydowski en fut un remarquable exemple), cela ne simplifiait tout de même pas les choses, face à une concurrence importante et très industrielle. Le soutien de Caudron était intéressant, puisque cette maison renommée tentait d'aborder les marchés militaires ; mais Caudron était un «outsider», face à Dewoitine (déjà!), Loire Aviation, Blériot-Spad, Morane-Saulnier, Bloch ou Wibault.

#### *3 - Les performances intéressantes, mais classiques, du V1*

Il semble normal que le ministère ait demandé que la version V1 soit améliorée. En effet, le programme des chasseurs monoplaces qui fut remis à niveau en 1930 ne généra pas moins (c'était l'époque de la «politique des prototypes») de 10 prototypes : Bernard 260, Blériot-SPAD S.510, Dewoitine D.500, Gourdou-Leseurre GL-482, Lorraine-Hanriot, Morane-Saulnier MS.325, Mureaux 170, Nieuport 122, Wibault 313 et Loire 43 !

Si le Dewoitine D.500 remporta la compétition, cela n'empêcha pas la commande de S.510, les chasseurs monoplans restant encore peu prisés par l'armée.

En comparant les performances annoncées du V1 et celles du D.500, monoplane qui vola pour la première fois en 1932 et du S.510, on obtient :

Si le V1 affichait des performances supérieures (à l'époque 400 km/h était un chiffre magique pour un avion de série), la différence pouvait encore s'améliorer, d'autant plus que le projet était perfectible...

#### *4 - Les performances du Virmoux V2, «trop belles pour être vraies» ?*

En mars 1934, le Service Technique Aéronautique (STAé) lança un programme de chasseurs monoplaces (C1) pour assurer le remplacement des chasseurs en service, notamment issus du programme de 1930. À cette époque, Lucien Virmoux avait reçu son projet de marché.

Il est étonnant que le projet V2 n'ait pas été intégré dans la fiche programme de 1934. Avec son moteur Hispano-Suiza, son train rétractable, ses performances, il semblait de nature à répondre aux besoins, pour peu que son habitacle soit fermé, ce qui n'était guère difficile à concevoir. Nous n'avons pas de masse indiquée, mais on peut supposer que le V2 n'était pas plus lourd que la concurrence, quand on voit ci-après ses performances

## HISTOIRE

### LES ORIGINES DE L'AÉRONAUTIQUE ROUMAINE SE RETROUVENT À PAU... DEPUIS L'ÉPOQUE DES PIONNIERS, D'ÉTROITES RELATIONS AVEC LA FRANCE

calculées, avec un moteur moins puissant.

Sortirent vainqueurs du programme de 1934 le Morane 405 et le Bloch 150. Dans le souci compréhensible de miser sur des motorisations variées, le premier utilisait le moteur en ligne Hispano-Suiza et le second, le moteur en étoile Gnome et Rhône 14N. Le projet théoriquement concurrent du V2 était donc le MS 405...

Le prototype vola en août 1935, comme le V2 aurait pu le faire !

Il semble, d'après les rares données d'époque dont on dispose, que, si le Virmoux V2 avait tenu ses promesses, il aurait, en effet, pu faire un bon chasseur moderne, notamment capable d'intercepter aisément un bombardier Heinkel 111 (vitesse proche de 420 km/h), ce que le Morane peinait à faire... Naturellement, la vitesse est importante, surtout à cette époque où l'Allemagne sort des prototypes de bombardiers plus rapides que les chasseurs en service. Mais il est évident qu'un chasseur n'est réussi que si son pilotage est aisé, sa manoeuvrabilité bonne et sa capacité d'armement suffisante. Les essais en vol étaient là pour le démontrer. Une chance que le Virmoux V2 n'eut pas.

Il faut aussi noter que le MS 405 sera modifié, pour fabrication de série, en MS 406, qui ne sortira qu'en 1938...et qui atteignait alors environ 480 km/h à 5000 m (croisière à 320 km/h).

Quant au Bloch 150 à moteur en étoile, il n'atteignit que 454 km/h à 2600 m avec un moteur de 900 cv et ne fut fabriqué en grande série qu'après d'importantes modifications, sous l'appellation Bloch 152. Ses performances, en 1939, soit 5 ans plus tard, atteignirent, avec un moteur de plus de 1000 cv, 510 km/h à 4000 m.

Il est regrettable que Lucien Virmoux n'ait pas eu l'opportunité de réaliser un prototype qui eut permis de démontrer les performances calculées sur la table à dessin. Son projet était plus performant que les prototypes issus du programme de 1934 et l'on peut raisonnablement estimer, compte tenu du temps qui fut nécessaire à la mise au point des modèles de série des MS.405 et Bloch 150, que Lucien Virmoux aurait eu du temps pour améliorer encore son projet, après les premiers essais en vol.

Sans doute une occasion manquée, puisque c'est seulement en 1940 que furent livrés les premiers Dewoitine 520, chasseur moderne apparu trop tard, capable de dépasser les 500 km/h.

*Avec l'aimable collaboration de Madame Janine Virmoux, fille de Lucien.*

#### **Sources principales :**

Archives personnelles de Lucien Virmoux mises à disposition par sa fille, Janine Virmoux  
Revue «Le fanatique de l'Aviation» N°65 et 78  
Journal «Les Ailes» décembre 1934 ■

# Histoire des premiers véhicules-fusées : les démonstrateurs de Buisson et Ciurcu

par Jean-Jacques Serra, membre de la Commission Histoire

*Les essais de véhicules terrestres propulsés par fusées de Valier et Opel à partir de 1928, ont fait l'objet d'une couverture médiatique mondiale et ont largement contribué à populariser ce moyen de propulsion. Bien peu se souvenaient alors que, quarante ans plus tôt, des essais de bateaux propulsés par fusée avaient été réalisés par Just Buisson et son ami Alexandre Ciurcu. Cette histoire tragique, puisque Buisson a trouvé la mort au cours de ces essais, est encore mal connue. L'objectif de cet article est de présenter l'enchaînement des événements qui ont conduit deux journalistes à réaliser cette première mondiale.*

## JUST BUISSON

Jean Marie Just Buisson est né à Tournon-sur-Rhône en Ardèche, le 5 juin 1843. Son père, Jean Louis Buisson, était percepteur et lui-même, après des études au lycée de Tournon, a commencé sa carrière à la recette générale de l'Ardèche <sup>1</sup>. Dès les années 1860, il s'intéresse à la propulsion et à la direction des aérostats ; il a « l'idée d'un nouveau moteur au moyen de gaz subitement développé par des inflammations de poudres » <sup>1</sup>. À cette époque, nombreux sont les inventeurs qui proposent des solutions, plus ou moins réalistes, pour diriger les aérostats. Beaucoup de brevets sont déposés, beaucoup de notes sont envoyées à l'Académie des sciences, et celle que Buisson envoie en 1867 ne retient pas son attention <sup>2</sup>. En janvier 1869, il s'installe à Bruxelles <sup>3</sup> où il devient journaliste, d'abord en reprenant une agence de publicité puis en travaillant pour le journal «Le Cosmopolite» <sup>4</sup>. Revenu en France, Buisson travaille comme journaliste à Paris et s'essaie même à la littérature dramatique <sup>5</sup>. Le 15 novembre 1878, il devient correspondant de l'agence Havas à Bucarest <sup>6</sup>. Là-bas, il fait la connaissance du

jeune Alexandre Ciurcu, qui le rejoindra plus tard dans ses recherches.

## ALEXANDRE CIURCU

Alexandre N. Ciurcu est né le 29 janvier 1854 à Șercaia, au sud de la Transylvanie, région appartenant à l'époque à l'empire d'Autriche. Il fera des études de droit à Vienne. En 1876, il s'établit à Bucarest où il travaille en tant que journaliste. En 1879, il fonde l'*Indépendance Roumaine*, un journal roumain de langue française. Il en est le directeur et son père Nicolas l'administrateur <sup>7</sup>. Les Ciurcu, père et fils, militent activement pour le rattachement de la Transylvanie au «Vieux Royaume» de Roumanie.

## DIRIGEABLE AVEC SYSTÈME DE PROPULSION

Fin juillet 1884, Just Buisson quitte son poste à l'agence Havas de Bucarest <sup>6</sup>. À cette époque, il est veuf depuis plus de dix ans. Il rentre en France avec sa compagne roumaine Katitza (Juliette) Lupescu pour s'installer à Asnières <sup>8</sup>. Il va pouvoir alors concrétiser son projet de propulseur à réaction directe. Plus tard, il expliquera s'être appuyé sur le concept d'aérostat dirigeable à hélice proposé par Dupuy de Lôme et expérimenté à partir de 1872 (voir Figure 1).

<sup>1</sup> "La mort d'un inventeur ardéchois", *Journal d'Annonay*, 1er janvier 1887

<sup>2</sup> "Note relative à la direction des aérostats" envoyé par Just Buisson à l'Académie des sciences, Vol.64, p.1187, séance du 10 juin 1867

<sup>3</sup> A Bruxelles, il épouse une ardéchoise, Marie Jallat, le 28 septembre 1869, quelques mois après la naissance de leur fils Florentin [Archives de la ville de Bruxelles].

<sup>4</sup> F. Sartorius, "Tirs croisés: la petite presse bruxelloise des années 1860", Ed. du Lerot, 2004.

<sup>5</sup> G. de Stella, "Alexandre Ciurcu, un inventeur", *Le Panthéon de l'industrie*, N°696, 1888

<sup>6</sup> G.C. Ionescu, "Les agences de presse de Roumanie et la circulation internationale de l'information (1877-1940)", Thèse, Paris 3, 13 janvier 2014

<sup>7</sup> "En Roumanie", *La Lanterne*, 3 avril 1888

<sup>8</sup> Just Buisson, Juliette Lupescu et Florentin vivaient à Asnières (au n°18 Avenue de Courbevoie) au début de 1886. [Recensement de la ville d'Asnières de 1886].

## HISTOIRE

### HISTOIRE DES PREMIERS VÉHICULES-FUSÉES : LES DÉMONSTRATEURS DE BUISSON ET CIURCU

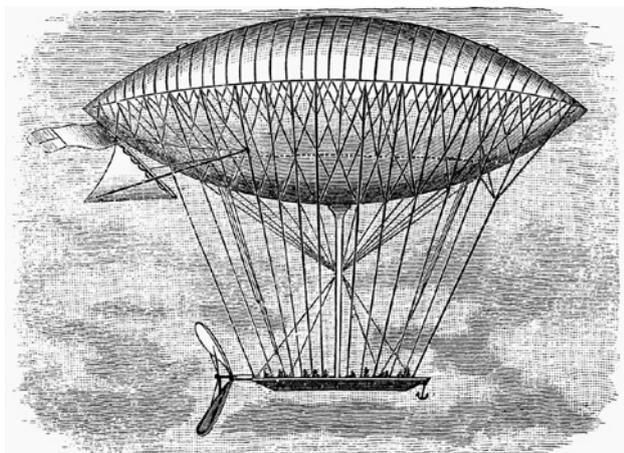


Figure 1 : Aérostat dirigeable de Dupuy de Lôme, expérimenté en 1872

Ainsi, en janvier 1885, il dépose son premier brevet intitulé « Aéronef ou ballon dirigeable »<sup>9</sup>. Ce brevet a pour objet d'équiper les aérostats dirigeables de son nouveau système de propulsion. Il décrit « un aéronef ou ballon dirigeable, plus lourd que l'air, mais partiellement allégé, dont l'ascension et la propulsion sont obtenues par la réaction exercée sur la culasse d'un canon par les gaz résultant de la combustion d'une charge de poudre, et dont la construction est caractérisée essentiellement par l'adaptation de canons ajustables, à âme lisse, se chargeant par la culasse et dont la bouche est fermée par un culot percé en son centre d'une ouverture taillée en biseau intérieurement...». Buisson propose 4 types de canons (voir Figure 2) avec des calibres de 70, 100, 150 et 200 mm. Ils sont chargés avec des blocs de poudre tubulaires moulés aux dimensions internes des canons et percés d'une âme cylindrique correspondant à environ un tiers du diamètre. La composition est celle de la poudre de mine, soit 62 parties de salpêtre, 20 de charbon et 18 de soufre, ou bien d'une poudre à combustion beaucoup plus lente, composée de 52,5 parties de nitrate de soude, 20 de soufre et 27,5 de tan et connue sous le nom de Pyronome de Tret.

Ce propulseur est installé sur une plate-forme mobile (voir Figure 3) qui permet de faire coïncider le centre du pivot des canons avec le centre de gravité de l'ensemble de la nacelle. Ainsi, pour le décollage le canon est orienté verticalement de manière à créer une poussée vers le haut. Ensuite, il agit horizontalement mais avec un angle d'orientation réglable de manière à diriger le ballon.

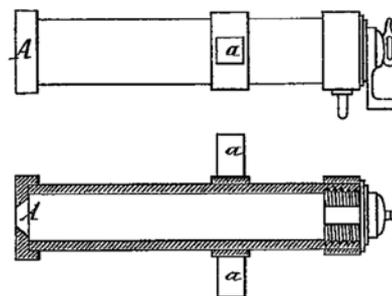


Figure 2 : Canon-propulseur décrit dans le brevet n°166364 [crédit INPI]

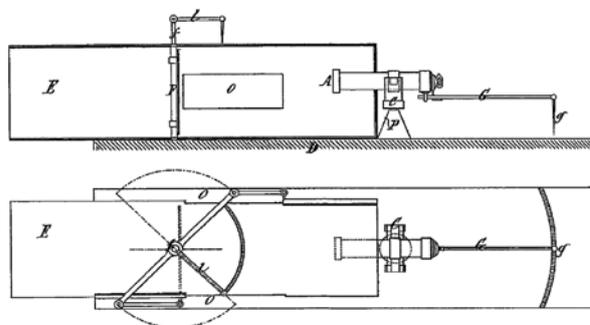


Figure 3 : Monture du canon-propulseur décrite dans le brevet n°166364 [crédit INPI]

Le système est équipé d'une cheminée destinée à canaliser les gaz éjectés afin d'éviter qu'ils n'incommodent les aéronautes. Celle-ci comporte de plus un dispositif permettant de réguler ou de stopper le flux axial des gaz qui sont alors éjectés par deux orifices diamétralement opposés. L'ensemble est appelé «Aéronef Buisson».

Buisson expose son idée à son directeur, Edouard Lebey, et à diverses personnalités aéronautiques de l'époque, notamment au comte d'Hérisson qui expliquera plus tard : « J'ai été mis en relation, il y a deux ans, avec M. Buisson, qui me fit part de son invention ayant pour but la direction des aérostats au moyen d'un propulseur nouveau, consistant en une poudre fusante qui, par la projection des gaz, devait imprimer une réaction motrice et se substituer ainsi tant aux machines électriques des capitaines Renard et Krebs qu'aux moteurs de Dupuy de Lôme. Je communiquai d'abord l'idée à M. le professeur Fuchs, de l'Ecole des mines, qui la trouva admirable, mais

<sup>9</sup> J. Buisson, "Aéronef ou ballon dirigeable", brevet n°166364 du 10 janvier 1885 ; déposé également en Allemagne, brevet n°32521 du 20 janvier 1885

ne la crut pas applicable. Buisson se livra à de nouvelles études et, dix-huit mois après, je sus qu'il avait proposé sa découverte au ministre de la guerre, M. le général Boulanger, qui, le reçut bien, dans la forme, mais le renvoya, quant au fond, à une commission.<sup>10</sup> »

En novembre 1885, Buisson dépose un nouveau brevet où son dispositif est décliné en tant que générateur de vapeur<sup>11</sup>. Cette « toute petite chaudière d'une capacité de 550 à 600 litres (1,50 m de long sur 0,70 m de diamètre intérieur) pourrait fournir à la consommation d'un moteur de 26,5 chevaux vapeur. » Selon lui, son application devrait s'imposer « pour la navigation aérienne et la navigation maritime de plaisance, pour les bateaux-torpilleurs, les bateaux sous-marins et les canonnières à faible tirant d'eau, pour les pompes à incendie, pour les tramways et autres voitures à vapeur, etc. » Avec ce nouveau dispositif, il vise des durées de fonctionnement plus longues qu'avec le précédent. Il préconise l'emploi de blocs de pyronome (voir Figure 4) qui brûlent « à la vitesse de 2,5 mm par seconde », mais songe déjà à d'autres mélanges « à base de nitrate de soude, de potasse ou de baryte, etc. »

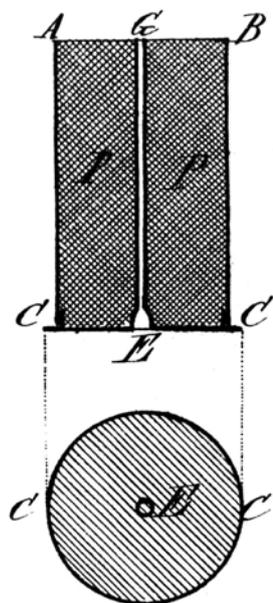


Figure 4 : Charge de pyronome décrite dans le brevet n°172461 [crédit INPI]

## ARRIVÉE DE CIURCU EN FRANCE

Le 16 septembre 1885, Alexandre Ciurcu et son père sont arrêtés au bureau de la rédaction de *l'Indépendance roumaine*<sup>12</sup>. Avec quelques autres irrédentistes qui prêchaient l'annexion à la Roumanie des provinces roumaines de Hongrie, ils sont expulsés du pays. Alexandre et Nicolas Ciurcu partent pour la France. La jeune épouse d'Alexandre Ciurcu reste en Roumanie, de même que sa mère et sa sœur<sup>13</sup>. Elle mourra quelque temps plus tard en exil<sup>5</sup>. En 1886, Alexandre Ciurcu est hébergé par Buisson. À la fin de l'année, ils habitent tous deux au n°2 square de la mairie (aujourd'hui rue des écoles) à Asnières<sup>14</sup>. Ciurcu va rapidement se joindre aux recherches de son ami : « Notre propulseur est basé sur le principe de réaction. Just Buisson a le premier eu l'idée de l'utiliser à la propulsion, et moi, je l'ai aidé à mettre son idée en pratique.<sup>15</sup> »

## LES EXPÉRIENCES SUR LA SEINE

La demande d'aide auprès du ministère de la Guerre ayant été infructueuse, Buisson et Ciurcu cherchent un financement privé pour poursuivre leurs travaux, comme l'explique le comte d'Hérissou : « ...les inventeurs se résignèrent à chercher un capitaliste qui leur fournit les moyens de construire un ballon. Je leur promis de m'en occuper, à condition qu'ils feraient d'abord leur démonstration sur un bateau.<sup>10</sup> » Les deux hommes se lancent donc dans la réalisation d'un premier appareil, n'ayant, comme le dit Ciurcu, « pas d'autre but que de nous permettre de faire la démonstration scientifique de notre découverte. » Cet appareil ne ressemble pas aux canons décrits dans le premier brevet, mais plutôt aux générateurs de gaz décrits dans le second. Il est constitué d'une « petite marmite en bronze d'une capacité d'environ trente litres. Sa hauteur n'est que de 50 centimètres et son diamètre en mesure 30 » (voir Figure 5). Cette marmite est équipée de poignées permettant à deux hommes de la manipuler et de la transporter sur un bateau et de la remiser après chaque voyage.

<sup>10</sup> Témoignage du Comte d'Hérissou au procès de Ciurcu en Février 1887, voir *La Croix* du 6 février 1887

<sup>11</sup> J. Buisson, "Générateur de vapeur à très haute tension", brevet n°172461 du 18 novembre 1885

<sup>12</sup> "Une expulsion", *Le Petit Troyen*, 19 septembre 1885

<sup>13</sup> *Le journal des débats*, 22 septembre 1885

<sup>14</sup> "Explosion d'un bateau à vapeur", *Le journal des débats*, 17 décembre 1886

<sup>15</sup> A. Ciurcu, "Expérience du propulseur à réaction", *La Nature*, N°735, 2 juillet 1887

## HISTOIRE

### HISTOIRE DES PREMIERS VÉHICULES-FUSÉES : LES DÉMONSTRATEURS DE BUISSON ET CIURCU



Figure 5 : Propulseur-fusée, première version [crédit La Nature]

La composition du combustible a évolué. Il est à présent « composé de 78 pour cent de nitrate d'ammoniaque et de 22 pour cent de pétrole ; après avoir mélangé intimement ces deux matières, nous y ajoutons 7 pour cent de charbon de bois concassé en petits morceaux et préalablement trempés dans une dissolution concentrée de nitrate d'ammoniaque. <sup>16</sup> » Le bloc de combustible (de 15 à 20 kg) est introduit dans la marmite par une tubulure latérale. Après allumage, cette tubulure est refermée au moyen d'un bouchon. Du côté opposé à cette ouverture se trouve l'orifice d'éjection des gaz qui produisent l'effet de réaction, orienté vers l'arrière du bateau. Il est équipé d'un papillon permettant d'ajuster le débit. Deux longs tubes perpendiculaires à l'axe du bateau permettent, si nécessaire, d'évacuer les gaz sans produire de poussée. Avec une charge de 15 kg de combustible, l'autonomie du système est d'une quinzaine de minutes, avec une pression variant entre 10 et 15 bars.

Dès la première expérience, le 3 août 1886, le bateau se révèle capable de remonter le courant de la Seine grâce à son « propulseur à réaction ». D'autres expériences suivent, au cours desquelles les deux amis

invitent quelques référents scientifiques, dont le comte d'Hérisson et le directeur du Service des poudres et salpêtres, Gustave Maurouard : « Mon ami Buisson et moi (...) nous étions mis en relations avec le ministre de la Guerre, et M. Maurouard, chef de division des poudres et salpêtres, avait été délégué par le ministre pour assister à nos expériences. Il rédigea un rapport favorable, et nous fûmes renvoyés par le ministre devant la commission d'aérostation militaire. <sup>17</sup> »

La validité du concept étant établie, il restait à résoudre le problème du fonctionnement en continu du propulseur à réaction. La solution retenue consistait à séparer les fonctions de génération et d'éjection des gaz en deux organes distincts. Avec deux générateurs de gaz reliés à un éjecteur unique, il était possible de charger un générateur pendant que l'autre fonctionnait. Chaque générateur fonctionnait ainsi à tour de rôle, assurant une production continue de gaz de propulsion. Les détails du dispositif ont fait l'objet de brevets communs de Buisson et Ciurcu déposés en octobre 1886 en France et en Allemagne <sup>16</sup>.



Figure 6 : Propulseur-fusée, deuxième version [crédit La Nature]

<sup>16</sup> J. Buisson et A. Ciurcu, "Propulseur à réaction", brevet n°179001 du 12 octobre 1886 ; également déposé en Allemagne, brevet n°39964 du 19 octobre 1886

<sup>17</sup> "Un nouveau moteur", *Le Temps*, 6 février 1887.

## HISTOIRE DES PREMIERS VÉHICULES-FUSÉES : LES DÉMONSTRATEURS DE BUISSON ET CIURCU

Le 17 septembre 1886, Just Buisson et Katitza Lupescu ont un fils qui sera prénommé Alexandre. Un peu plus tard, une nouvelle série d'expériences commence à la fin de l'année 1886<sup>18</sup>. L'ancienne marmite sert d'éjecteur et une nouvelle marmite de générateur de gaz, pour l'instant unique (voir Figure 6). Ce générateur est un simple cylindre en tôle d'acier de 7 mm, mesurant 1 m de long et 40 cm de diamètre. Il est équipé d'une porte à fermeture rapide, d'une soupape de sûreté, d'un manomètre, ainsi que des deux tubes de décharge. Un tube métallique fait communiquer le générateur et l'éjecteur. Les blocs de combustible sont préparés à l'avance dans deux auges en forme de demi-cylindre pouvant être introduites rapidement dans le générateur, en les poussant sur des glissières placées à l'intérieur.

Le 16 décembre 1886, Buisson et Ciurcu ont préparé une expérience avec un bateau équipé de ce nouveau dispositif. Deux invités de marque observeront l'essai depuis la rive : le comte d'Hérisson et Edmond Blanc qui se proposait de financer leurs travaux à venir. Pour la circonstance, Buisson a embauché un jeune garçon du nom de Maigret pour guider le bateau. Quelques secondes à peine après la mise en route du propulseur, une explosion détruit intégralement le bateau. Buisson est projeté en l'air. Ciurcu a pu se jeter à l'eau, et parvient à regagner la rive à la nage. Quant au jeune Maigret, il a tout simplement disparu. Recueilli par un autre bateau, Buisson est déposé, mourant, à terre.

Voici comment Ciurcu racontera la scène : « Nous avions déjà manœuvré plusieurs fois avec succès, et nous savions que nous ne devons pas dépasser 10 à 12 atmosphères de pression, bien que la résistance fût de 20. Le 16 décembre, à peine embarqué, je vis la pression s'élever à 5. Buisson ouvrit le papillon et elle retomba à 0 ; il referma et elle revint à 5 ; il rouvrit et elle retomba aussitôt ; puis il ferma encore, tout cela en un clin d'œil ; mais il ne put pas rouvrir cette fois et je vis le manomètre, que je ne quittais pas des yeux, marquer, en moins d'une seconde, 19. J'ouvris fébrilement toutes les soupapes ; il

était trop tard, tout était perdu ; je n'eus que le temps de me jeter de côté dans l'eau et je reçus une plaque de tôle qui m'étourdit et me fit pivoter en l'air, de façon que tout le combustible me tomba dans la figure, je m'évanouis, l'eau glacée me réveilla et je nageai jusqu'au bord, quoique blessé.<sup>19</sup> »

### LE PROCÈS DE CIURCU

Seul survivant de ce tragique accident, Ciurcu est accusé d'homicide par imprudence. Le procès débute le 4 février 1887<sup>20</sup>. Après le témoignage du comte d'Hérisson, viennent les compte-rendus des experts. Kremer estime que Buisson et Ciurcu ne se sont pas bien rendu compte « de leur composition et, par conséquent des dangers que présentait son emploi ». Ils auraient dû « requérir le concours d'un ingénieur, qui certainement se serait opposé à une semblable expérience »<sup>21</sup>. Il critique les détails de construction de l'appareil, dont il juge insuffisante l'épaisseur de paroi. Au contraire, Leblanc « démontre que l'explosion n'est nullement due à cette cause et rend hommage à la science du malheureux Buisson »<sup>22</sup>.

Il s'avère que Buisson, pour montrer que la montée en pression pouvait être très rapide, a employé une dose d'amorce trop importante, ce qui a causé le blocage du papillon de réglage. Attendu qu'il n'est ni l'inventeur, ni le constructeur de la machine, qu'il n'a pas pris part à l'imprudence commise par Buisson, ni à la décision d'engager le jeune Maigret, Alexandre Ciurcu est acquitté le 11 février. Malgré ce verdict favorable, il s'engage à indemniser la famille Maigret et à prendre à sa charge l'entretien des deux orphelins mineurs de Buisson<sup>5</sup>.

### LES EXPÉRIENCES DE 1887-1888

Dès le 20 janvier 1887, Ciurcu avait déposé une addition au brevet sur le propulseur à réaction, portant sur une nouvelle porte à fermeture rapide pour le générateur de gaz<sup>23</sup>. La même année, le brevet est déposé en Angleterre,

<sup>18</sup> Archives de la ville d'Asnières, 1886.

<sup>19</sup> Plaidoirie d'A. Ciurcu durant son procès en Février 1887, voir *La Croix* du 6 février 1887

<sup>20</sup> Durant le procès, Ciurcu était soutenu par la famille de Buisson, surtout par ses deux frères vivant à Paris : Joseph, rédacteur à l'Agence Havas, et Louis, directeur des Manufactures d'état (tabacs).

<sup>21</sup> "Un nouveau moteur", *Le Temps*, 6 février 1887

<sup>22</sup> "Explosion en Seine du bateau d'un inventeur", *Le Gaulois*, 5 février 1887

<sup>23</sup> A. Ciurcu, Addition au brevet n°179001 déposée le 20 janvier 1887

## HISTOIRE

### HISTOIRE DES PREMIERS VÉHICULES-FUSÉES : LES DÉMONSTRATEURS DE BUISSON ET CIURCU

Belgique, Italie et Autriche-Hongrie <sup>24</sup>. Le gouvernement roumain qui l'avait exilé ayant été contraint à démissionner en avril 1888, Ciurcu se rend en Roumanie. La population de Bucarest lui fait une ovation et ses amis le prient de revenir en politique. Il refuse : il veut se consacrer entièrement à ses recherches <sup>5</sup>. De retour en France, il entreprend de constituer une société pour l'industrialisation de ce propulseur et pour l'exploitation de ses brevets.

En France, le propulseur à réaction intéresse le ministère de la Guerre qui décide de financer des essais à la Poudrerie nationale de Sevran-Livry. Ciurcu va y procéder à « une longue série d'expériences avec ses nouveaux appareils, sous la surveillance et avec le concours de M. l'ingénieur Vieille, l'inventeur de la nouvelle poudre du fusil Lebel. <sup>25</sup> » Ces expériences, qui consistent à faire circuler un wagonnet sur une voie ferrée grâce au propulseur à réaction, seront couronnées de succès. Ciurcu a résolu les problèmes de sécurité du précédent dispositif : il peut régler à volonté la pression des gaz ; il est allé jusqu'à fermer, pendant la durée de combustion d'un bloc fusant, tous les orifices d'éjection, les gaz s'échappant alors de manière contrôlée par des soupapes automatiques. Le 12 octobre 1888, il fait une démonstration fort réussie devant le ministre de la Guerre, Charles de Freycinet <sup>26</sup>.

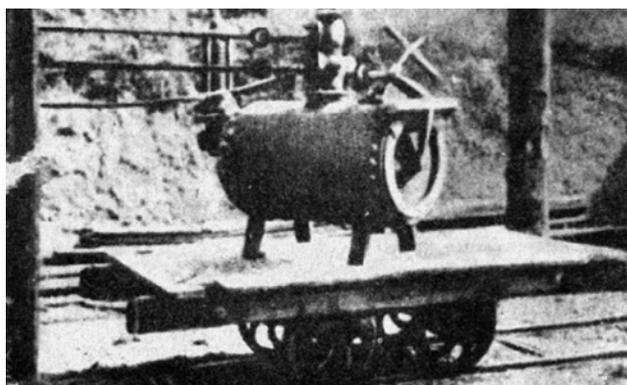


Figure 7 : Dispositif version 1888 sur un wagonnet

Les détails de ces améliorations sont révélés dans un nouveau brevet déposé en 1889 aux Etats-Unis <sup>27</sup>. Dans cette ultime version, Ciurcu revient à la formule à un seul cylindre, tout en précisant qu'au moins deux générateurs sont nécessaires pour assurer un fonctionnement en continu du propulseur. Il propose également d'utiliser les jets latéraux de manière indépendante pour pouvoir diriger le mobile.

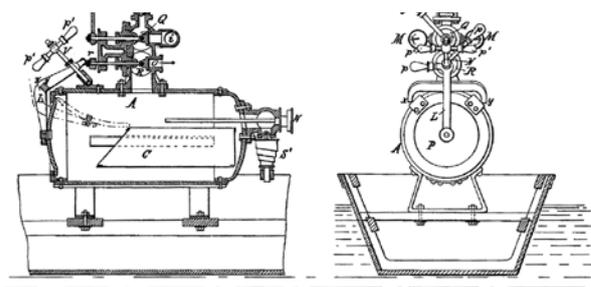


Figure 8 : Dernière version du propulseur-fusée décrite dans le brevet US N°407394

Malgré ses efforts, Ciurcu ne parviendra pas à réunir les capitaux nécessaires pour une exploitation industrielle de son propulseur.

#### L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1889

En 1889, Paris organise l'Exposition universelle du 5 mai au 31 octobre. Ciurcu va prendre l'initiative de la participation de la Roumanie à cette exposition. Il sera aidé par d'illustres personnalités francophiles de son pays, notamment le prince Bibesco. À l'époque, le rapport de l'exposition précise : « M. Ciurcu n'a pas abandonné son invention, quoique ses travaux scientifiques aient subi un temps d'arrêt à cause des occupations que lui a donné l'Exposition. Espérons qu'il reprendra bientôt ses expériences si intéressantes, maintenant qu'il a assuré le succès de son pays à l'Exposition universelle de 1889 » <sup>28</sup>. Malheureusement, Ciurcu ne trouvera pas le soutien financier attendu et sera amené à renoncer au projet de son ami Buisson.

<sup>24</sup> Brevet n°8182 du 7 juin 1887 en Grande Bretagne, brevet n°77754 du 8 juin en Belgique, brevet n°21863 du 17 juin en Italie, brevet n°41129 du 21 juin en Autriche-Hongrie

<sup>25</sup> "Un inventeur", *Le Figaro*, 6 juin 1888

<sup>26</sup> "Nouvelle excursion du ministre de la guerre", *Le Figaro*, 13 octobre 1888

<sup>27</sup> A. Ciurcu, "Apparatus and Means for Propelling by Reaction", brevet US n°407394 du 23 juillet 1889

<sup>28</sup> "Les merveilles de l'exposition universelle de 1889", ouvrage collectif, 1889

## HISTOIRE DES PREMIERS VÉHICULES-FUSÉES : LES DÉMONSTRATEURS DE BUISSON ET CIURCU

### RETOUR EN ROUMANIE

Alexandre Ciurcu quitte Paris en 1890 pour revenir en Roumanie avec Alexandre, le plus jeune fils de Buisson, et sa mère Katitza Lupescu qu'il épousera un peu plus tard <sup>29</sup>. À Bucarest, il retrouve son ancienne profession de journaliste. Il sera ensuite premier adjoint au maire de Bucarest, député, président du syndicat des journalistes. Il s'éteindra le 22 janvier 1922 sans avoir, à aucun moment, repris ses travaux sur la propulsion à réaction.

### CONCLUSION

Le propulseur à réaction conçu par Just Buisson dès 1867 et expérimenté avec l'aide d'Alexandre Ciurcu à partir de 1886 était initialement destiné à la direction des aérostats. La nécessité de valider le concept a conduit à la réalisation de démonstrateurs pouvant se déplacer sur l'eau ou sur rails. Ce furent les premiers véhicules-fusées de l'histoire.

Le malheureux accident de décembre 1886, qui a coûté la vie à Buisson, a amené Ciurcu à poursuivre seul la mise au point du propulseur pendant deux ans. Il avait résolu les problèmes de sécurité et introduit un système de pilotage par jets latéraux quand il a dû abandonner le projet par manque de financement.

Si le rôle d'Alexandre Ciurcu dans l'histoire de la propulsion-fusée est reconnu dans son pays, ce n'est malheureusement pas le cas de Just Buisson qui est pourtant à l'origine des leurs travaux.

*Note : Une des versions originales du propulseur à réaction a été conservée, d'abord au domicile de Ciurcu à Bucarest, puis après sa mort, au Musée technique de Bucarest <sup>30</sup>. ■*

<sup>30</sup> F. Zăgănescu, R. Burlacu and I.M. Stefan, "Contribution of the Romanian Inventor Alexandru Churcu to the Development of Theoretical and Practical Reactive Motion in the 19th Century", 17th History Symp. of the IAC, Budapest, Hungary, 1983

# Robert Esnault-Pelterie, précurseur de l'aéronautique

par Bruno Chanetz, rédacteur en chef et Marie-Claire Coët, ONERA, membre senior 3AF

*Le 15 janvier 2020, en compagnie de Jean Détery, nous avons effectué une demi-journée de tri d'archives aux Mureaux, dans les locaux d'ArianeGroup, où étaient conservés les documents 3AF subsistant depuis l'époque où l'association avait son siège à Verneuil. Parmi les dossiers inventoriés : une liasse relative aux essais de moteurs fusée de Robert Esnault-Pelterie, effectués en majeure partie dans sa propriété familiale de Boulogne-Billancourt pour le compte de l'Armée.*

## UN PIONNIER DE L'AVIATION ET DE L'ESPACE

Le Français Robert Esnault-Pelterie (1881-1957), aviateur et ingénieur, s'illustra en aéronautique et en astronautique. Dès son plus jeune âge, il montra le goût le plus vif pour la mécanique et son père, pour l'encourager, mit à sa disposition un petit atelier<sup>1</sup>.

Dès le début du XXe siècle il commence par construire ses propres appareils, les monoplans baptisés R.E.P. selon ses initiales.



Robert Esnault-Pelterie

En 1906, il crée un atelier à Boulogne-sur-Seine et construit avec quelques aides, un moteur d'avion et la cellule. Le premier R.E.P est un cinq cylindres en éventail, qui atteint 30 ch et qui est le premier moteur à ailettes

refroidi par air. En 1907, il crée un sept cylindres selon les mêmes principes. Il sera aussi l'inventeur du « manche à balai ». Dès les années 1910, il s'engage dans la conquête spatiale et travaille sur les fusées. En 1930, il publie *L'Astronautique*, ouvrage dans lequel il dresse l'inventaire des connaissances astronautiques de l'époque<sup>2</sup>. Pierre Contensou, qui fut directeur général de l'ONERA, reconnaîtra : *Les idées que présente Esnault-Pelterie, à propos de la navigation sont incontestablement originales, en ce sens qu'il les a empruntées à aucun de ses devanciers*<sup>1</sup>.

En cette même année 1930, il débute ses travaux expérimentaux dans son laboratoire du 37 rue des Abondances à Boulogne-sur-Seine. Ne disposant pas encore des subsides de l'état, il les finance lui-même et contacte, à l'automne 1930, Pierre Montagne, professeur de thermodynamique à l'École polytechnique et chercheur à l'École des Mines, pour connaître le meilleur rapport de mélange entre l'oxygène liquide et l'éther de pétrole (essence légère). Quant au lieutenant Jean-Jacques Barré, polytechnicien qui lui a apporté depuis 1927 son aide précieuse, il doit s'éloigner dès le mois de septembre 1931 car selon sa hiérarchie : *l'étude des fusées ne pouvait absorber l'entière activité d'un officier*.

Considérant que l'oxygène liquide - qui avait ses faveurs - est dangereux, il étudie divers carburants dont le tétranitrométhane préparé par le professeur Darzens à l'École polytechnique. Le 9 octobre 1931 à 15h45, alors qu'il manipule des éprouvettes, une violente explosion se produit, lui arrachant l'extrémité de quatre doigts de la main gauche. Cet accident remua l'inertie de l'Administration<sup>2</sup> et à l'initiative du général Ferrié, le ministère de la Guerre lui attribua quelques jours plus tard 15 000 francs de subvention. Il s'entoure alors de Raymond Savalle, ingénieur des Arts et Métiers, d'un dessinateur, d'une dactylographe et d'un tourneur-fraiseur Monsieur Thouvenin.

En juillet 1932, le général Weygand se déclare prêt à doubler, voire à tripler, la subvention si les résultats sont tangibles au bout de trois ans. De fait en juin 1933, la subvention passe à 25 000 francs et dès lors quatre ouvriers entourent l'inventeur.

<sup>1</sup> Fascicules expérimentaux 1934 (E1 à E10)

<sup>2</sup> Fascicules expérimentaux 1935 (premier semestre - E11 à E21)

**QUELQUES RÉSULTATS EXTRAITS DE SES RAPPORTS À L'ARMÉE**

En feuilletant les rapports découverts aux Mureaux, on découvre les divers essais auxquels il s'est livré, parfois en présence de personnalités officielles.

**6 AOÛT 1934**

Des essais sont réalisées à Satory, ce qui constitue une exception, presque tous les autres ayant lieu chez lui à Boulogne-sur-Seine. Il s'agit d'essais préliminaires de réglage des orifices de débit du combustible et du comburant. Il écrit la formule chimique de la réaction en confondant éther de pétrole et hexane alors qu'exactement on a 0,76 % d'hexane et 0,24 % de pentane (c'est lui-même qui donne cette précision) :



La combustion de 86 g de carbure avec 208 g d'oxygène (proportion de carbure 86/208 = 0,414) est réalisée via trois orifices débitant sous 5 kg de pression à un débit de 186 g/s. Les bavures sur les orifices nécessitent un réalésage.

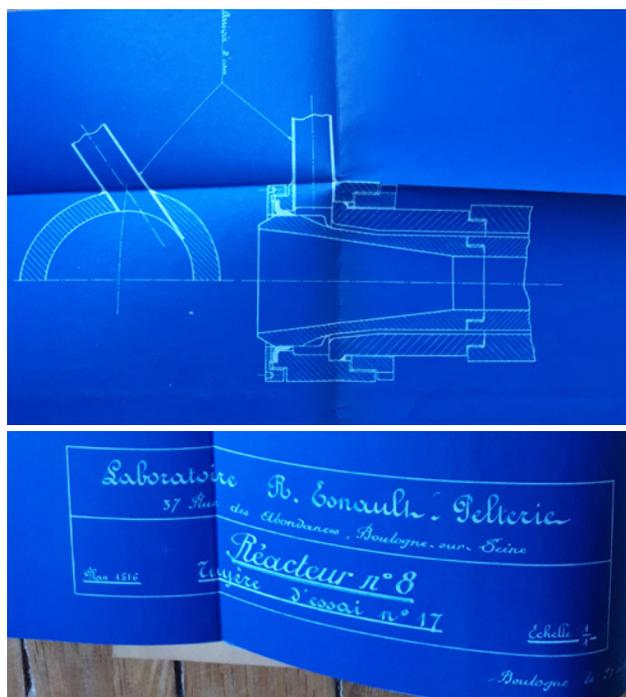
**8 DÉCEMBRE 1934**

Il tente des essais de fragilité à la température de l'air liquide d'un ressort en acier « Amanimphy » et de quelques autres matériaux. Pour ce faire, Il trempe l'objet dans l'air liquide et rapidement le porte sur une enclume où il fut violemment frappé au marteau. Les spires s'écrasent sans se casser. Il profite alors de ce qu'il lui reste d'air liquide pour effectuer quelques essais

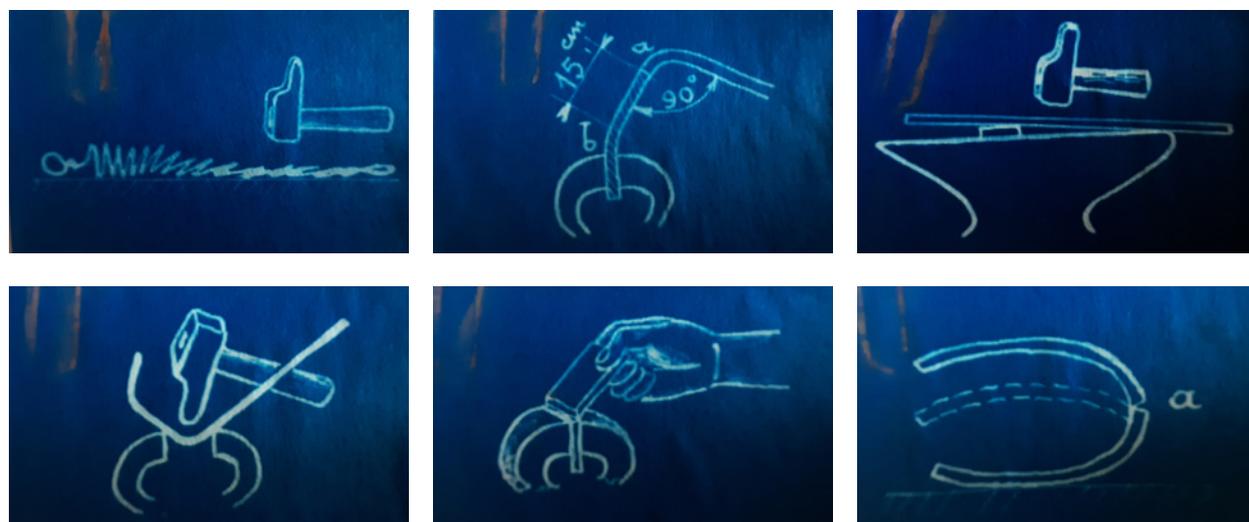
rudimentaires de fragilité sur les matériaux suivants : acier mi-dur, corde à piano, fibre rouge, cuir qui même après ce traitement faisait encore preuve d'une très légère élasticité. Les expériences sont illustrées de petits croquis tracés à main levée.

**24 OCTOBRE 1935**

Il mène le premier essai de mise à feu avec une chambre tubulaire suivie d'un divergent.



*Premier essai d'une chambre suivi d'un divergent*

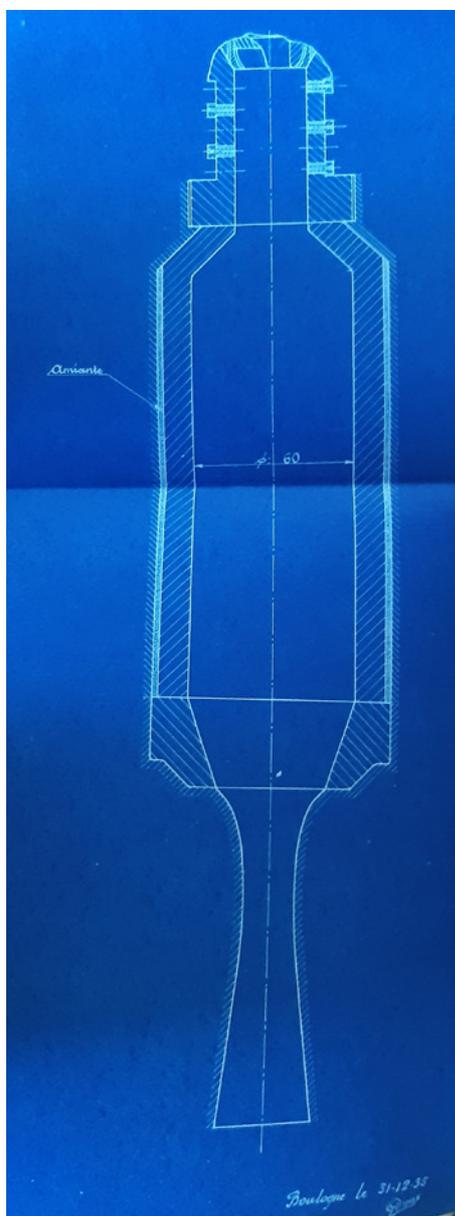


*Essais de fragilité des matériaux à la température de l'air liquide*

## TRÉSOR D'ARCHIVES ROBERT ESNAULT-PELTERIE, PRÉCURSEUR DE L'ASTRONAUTIQUE

4 ET 10 JANVIER 1936

Il étudie la chambre volumétrique afin de déterminer le rapport minimum  $\varrho V/S$  et de l'épaisseur calorifuge minimale. L'essai du 10 janvier 1936 est fait en présence de son collaborateur Pierre Montagne. Son rapport achevé dès le 15 janvier 1936 mentionne : *D'abord la tuyère s'est comportée exactement comme dans l'essai précédent (celui du 4 janvier) et le convergent en graphite, qui primitivement était conique avec 60 et 39 mm aux bases, s'est creusé régulièrement en forme de cupule, se raccordant exactement avec l'arrondi du col, quelques coulures d'amiante fondue étaient accrochées vers cette dernière partie.*



Chambre et tuyère

27 MAI 1936

Il note : *L'essai eut lieu en présence de MM. le maréchal Pétain, le général Maurin, ministre de la guerre, de MM. les contrôleurs généraux Guinand et Laporte, de MM. les généraux Belhague, Happich, de M. l'ingénieur général Desmazieres, accompagnés des officiers des services techniques du ministère de la guerre ; M. le capitaine de vaisseau Mouren et la capitaine de frégate Emmanuéli représentants du ministère de la marine.*

Il utilise une culasse à sept chambres de pré-mélange. L'allumeur est constitué d'un mince jet d'éther de pétrole sous pression. L'essai dura 64,5 s. La température de l'enveloppe non refroidie du réacteur resta inférieure à 100°C. Il mesure une vitesse d'éjection de 2270 m/s, inférieure à ce qu'elle aurait dû être s'il avait réussi à atteindre le rapport de carburation théorique. La culasse est partiellement brûlée à la sortie des chambres de pré-mélange. Il en conclut que les douilles formant les chambres de pré-mélange devront être refaites en cuivre rouge à la place du laiton.

12 JUIN 1936

Il note : *L'expérience réalisée relatée ici eut lieu en présence de M. le contrôleur général Laporte accompagné du Colonel Véron, de MM. Caquot et Villey, enfin de M. l'ingénieur militaire Tercé collaborateur de l'ingénieur général Desmazieres.*

Malgré le remplacement du laiton par le cuivre et une modification dans le protocole d'allumage, la culasse cède. Il poursuit et c'est lui-même qui souligne : *Cet essai malheureux est pourtant d'une utilité capitale : il montre que, quel que soit le procédé de mise en route envisagé, il doit être tel que le réactif admis en premier ne puisse pas pénétrer et demeurer à l'état liquide dans les canaux d'admissions de l'autre. Il y a donc intérêt à admettre en premier l'oxygène qui, au début, est gazeux. Les jets préalables d'éther de pétrole formant allumeur devront être disposés de manière à ne jamais pouvoir projeter de gouttelettes remontant par les gicleurs à oxygène, c'est par hasard que les dispositifs utilisés jusqu'à présent avaient satisfait à cette condition.*

Parmi les spectateurs de cet échec, son confrère à l'Académie des sciences Albert Caquot, qui à cette époque n'a aucun rôle officiel, mais avec qui il sera bientôt en conflit ouvert et durable à propos de la normalisation industrielle.

Robert Esnault-Pelterie échouera finalement à mettre

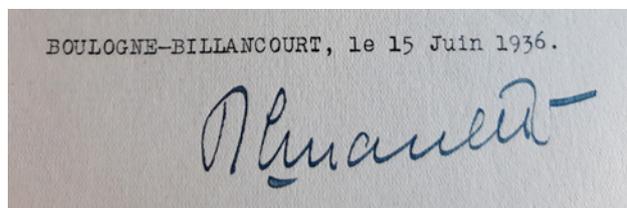
au point la première fusée française à carburant liquide.

### HOMMAGES POSTHUMES

Cependant, ainsi que l'exprime Pierre Bétin dans la préface de la biographie d'Esnault-Pelterie <sup>1</sup>: *Les russes, premiers explorateurs de l'espace, connaissaient leur dette envers un homme qu'ils ont été les premiers à traduire dans leur langue.*

Robert Esnault-Pelterie, meurt le 6 décembre 1957, deux mois après qu'à Baïkonour, le Spoutnik eut quitté la Terre et fait son incursion dans l'espace (4 octobre 1957).

L'année suivante, en aout 1958, lors du 9e congrès international d'Astronautique à Amsterdam, tous les délégués rendirent hommage à Robert Esnault-Pelterie. Signe tangible de cette reconnaissance à l'égard de l'inventeur, les organisateurs du congrès remirent à tous les participants le texte de la conférence qu'il donna le 15 novembre 1912 à la Société française de physique et qui analysait la possibilité des voyages interplanétaires, l'un des textes phares de l'exploration spatiale.

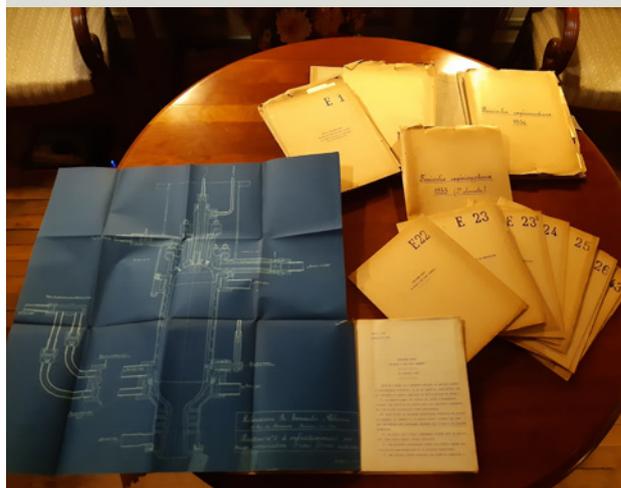


### RÉFÉRENCES

1. Felix Torres et Jacques Villain *Robert Esnault-Pelterie – Du Ciel aux étoiles, le génie solitaire* Editions confluentes 2007
2. Pierre Contensou et Jacques Villain *Esnault-Pelterie Robert (1881-1957)* Encyclopaedia Universalis [en ligne] <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/robert-esnault-pelterie/>  
*Constitution du dossier : 4 chemises contenant*

1. Fascicules expérimentaux 1934 (E1 à E10)
2. Fascicules expérimentaux 1935 (premier semestre – E11 à E21)
3. Fascicules expérimentaux 1935 (2e semestre – E22 à E47)
4. Fascicules expérimentaux 1936 (E48 à E68)

Tous ces exemplaires sont numérotés à la main.  
Nos exemplaires portent tous le n°7. ■



# « Intelligence artificielle, l'affaire de tous : de la science au business » de Thierry Bouron paru aux éditions Pearson en juillet 2020

par Bruno Chanetz, rédacteur en chef



Thierry Bouron a effectué une thèse à l'ONERA sur l'Intelligence artificielle (IA) dans les années 80 sous la direction de Jean Erceau<sup>1</sup>. Il a dirigé des recherches en IA chez Orange et fondé des programmes innovants sur l'économie numérique. En charge de l'exploitation de services de données clients et d'outils de

recommandations personnalisés dans le WEB, il utilise les techniques du *machine learning* à des fins opérationnelles. Il enseigne le management et le business de l'IA à la Skema Business School. Thierry Bouron n'en est pas à son premier ouvrage. Le 13 février 2019, Thierry Bouron était venu à l'ONERA à l'invitation d'Alumni-ONERA pour donner une conférence l'innovation au fil du temps à partir de son livre *L'innovation 50 success stories ruptures, héritages et coups de génie* paru chez DUNOD.

Le présent ouvrage traite de l'Intelligence artificielle (IA). Le premier à envisager l'intelligence des machines est le mathématicien britannique et cryptologue Alan Turing qui durant la seconde guerre mondiale contribua à percer le secret de la machine Enigma utilisée par les armées allemandes. Après la guerre il conçoit les premiers ordinateurs et énonce dès 1948 ce que pourrait être une machine pensante tout en reconnaissant qu'il « *serait tout à fait abusif de s'attendre à ce qu'une machine sortie d'usine soit compétitive ou l'égale d'un diplômé universitaire* ». Soixante-dix ans plus tard, de telles machines pensantes existent et surpassent l'homme. En octobre 2015, AlphGO devient le premier programme à battre un champion au jeu de go. Les victoires des logiciels d'échec dix ans auparavant étaient avant tout fondées sur des performances de calcul, les logiciels étant plus simple à concevoir. Avec le jeu de go, le nombre de situations étant considérablement accru, les stratégies gagnantes sont apprises à partir d'un grand nombre d'exemples de parties. Plus encore, l'évolution AlphaGo Zero a montré des performances accrues : *l'IA s'est entraînée contre elle-même sans avoir connaissance de parties jouées entre*

*les humains. Apprendre par soi-même, ne serait-ce pas là encore faire preuve d'intelligence ?*

D'autres réalisations des IA sont tout aussi marquantes : achèvement de la symphonie n°8 de Schubert, écriture de poèmes, avènement des véhicules autonomes et des populations de robots se mouvant dans les entrepôts d'Alibaba et d'Amazon, capacité de traduction et faculté de conversation. Cette dernière performance mérite d'être soulignée car souvent présentée comme preuve de la suprématie de l'homme sur les autres espèces. Or l'assistant de Google parvient à ne pas être décelé au cours d'échanges téléphoniques avec les accueils d'un restaurant ou d'un salon de coiffure.

Dans les dix prochaines années, nous allons côtoyer toutes sortes d'intelligences artificielles (IA). Nous en croisons d'ailleurs déjà. L'arrivée de robots-taxis, le sens de l'à-propos d'assistants virtuels et la suprématie de logiciels dans des jeux de stratégie montrent l'imminence d'un nouveau monde.

Mais les IA n'habitent pas que des robots, ce sont souvent des logiciels dans la finance, la justice, le commerce, la santé et aussi l'armement, où les solutions de suivi utilisées dans les véhicules autonomes servent également à poursuivre des cibles. Les grandes puissances s'inquiètent d'ailleurs de l'usage de flottes de drones à usage militaire dans la mesure où de telles armes sont beaucoup plus faciles à développer que la bombe atomique, une trentaine d'ingénieurs spécialisés pouvant les finaliser en trois à cinq ans avec des technologies en *open source*.

Ce livre permet de découvrir l'IA telle qu'elle est aujourd'hui dans sa pluralité, avec ses dimensions business et techniques. À travers un grand nombre d'exercices ludiques, il permet de comprendre les principes de fonctionnement de l'IA et ses fondements scientifiques, ses enjeux économiques et sociétaux ainsi que les risques et questions éthiques à considérer. ■

<sup>1</sup> voir article de Laurent Chaudron : *L'intelligence artificielle symbolique contre-attaque dans Lettre 3AF n°34 (novembre-décembre 2018)*

## ÉVÉNEMENTS 3AF

# LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS



### SPACE PROPULSION

8 - 12 FÉVRIER 2021 À ESTORIL, PORTUGAL

7<sup>th</sup> EDITION OF THE SPACE PROPULSION CONFERENCE



8-12 FEBRUARY 2021 • ESTORIL, PORTUGAL



### AERO 2020+1

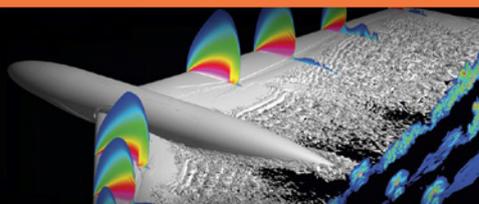
12 - 14 AVRIL 2021 À POITIERS



55<sup>th</sup> 3AF International Conference

# AERO2020+1

Poitiers, France - April 12-13-14, 2021



### IES 2020

5 - 6 MAI 2021 À PARIS

15<sup>ème</sup> Forum EUROPEEN  
**IES2020**  
PARIS, 5-6 MAI 2021

30 ans pour  
éclairer l'avenir



Espace Chaptal, 23 Rue Chaptal - 75009 Paris

[www.ies2020.com](http://www.ies2020.com)



### COLLOQUE ISMAËL BOULLIAU

4 JUNI 2021 À LOUDUN



### IAMD

15 - 17 JUNI 2021 À NICE



14<sup>th</sup> 3AF INTERNATIONAL CONFERENCE  
INTEGRATED AIR AND MISSILE DEFENCE

JUNE 15-17, 2021 - NICE, FRANCE



COLLOQUE AÉROSTATION ET DIRIGEABLES À MEUDON EN HOMMAGE À ALBERT CAQUOT POUR LE 140<sup>E</sup> ANNIVERSAIRE DE SA NAISSANCE  
18 JUNI 2021 À MEUDON



Association Aéronautique  
et Astronautique de France