



Association Aéronautique
et Astronautique de France

LETTRE 3AF

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



INTERVIEW DU GÉNÉRAL
PHILIPPE STEININGER (CNES)



LA SIMULATION NUMÉRIQUE
PAR STÉPHANE ANDRIEUX (ONERA)



MOBILITÉ URBAINE AÉRIENNE



DOSSIER DÉCARBONATION ET HYDROGÈNE



LE CONSEIL NATIONAL DE
L'HYDROGÈNE PAR LE DÉPUTÉ
MICHEL DELPON



VERS L'AVIATION DÉCARBONÉE
PAR STÉPHANE CUEILLE (SAFRAN)

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-Yves Guédou
Bertrand de Montluc
Jean-Pierre Sanfourche
Jean Tensi
Pierre Tréfourcet
Bernard Vivier

CONCEPTION GRAPHIQUE
ICI LA LUNE
www.icilalune.com

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

Les opinions émises dans les
articles n'engagent que leurs
auteurs et ne sauraient être
considérées comme une prise
de position officielle de la 3AF

3 ÉDITORIAL

4 MESSAGE DU PRÉSIDENT

INTERVIEW

- 5 INTERVIEW DU GÉNÉRAL PHILIPPE
STEININGER, CONSEILLER MILITAIRE
DU PRÉSIDENT DU CNES
par Jean-Pierre Sanfourche

POINT DE VUE

- 9 IRRUPTION DE L'IA, DÉLUGE DES
DONNÉES
par Stéphane Andrieux
- 14 L'HYDROGÈNE SUR ORDONNANCE :
LE COMITÉ NATIONAL HYDROGÈNE
par Michel Delpon
- 19 VERS L'AVIATION DÉCARBONÉE !
par Stéphane Cueille

ACTUALITÉS

- 22 L'ONERA ET LE PÔLE HYDROGÈNE EN
OCCITANIE
par Nicolas Bertier

AÉRONAUTIQUE

- 24 L'HYDROGÈNE POUR L'AVIATION,
DE GRANDS DÉFIS : COMBUSTION,
INJECTEUR, ET MISE EN ŒUVRE
par Paul Palies
- 29 ÉNERGIES PRIMAIRES ET
CARBURANTS ALTERNATIFS
par Philippe Novelli
- 33 MOBILITÉ À LA DEMANDE, MOBILITÉ
URBAINE AÉRIENNE, ET MOBILITÉ
AÉRIENNE AVANCÉE
*par Henry de Pinval, Jean Hermetz et
Arnaud Le Pape*
- 42 UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM
OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN
par Michel Aguilar
- 46 LE THERMORÉACTEUR CVC :
UNE RÉVOLUTION DANS LE MONDE DE
LA PROPULSION ?
par Michel Aguilar
- 54 MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE ET
AÉRODYNAMIQUE OPTIMISÉE
par Benjamin Deveaux
- 56 LA MÉCANIQUE DES FLUIDES
NUMÉRIQUE DANS LES ANNÉES 2020
par Philippe Spalart
- 64 MORPHING D'ARRIÈRE-CORPS POUR
RÉDUIRE LA TRAÎNÉE DES VÉHICULES
TERRESTRES
par Olivier Cadot

- 69 PRIX 3AF : DÉTECTER DES IMPACTS
PAR SURVEILLANCE VIBRATOIRE
par Dimitri Goutaudier

- 75 PRIX 3AF : METTRE EN ORDRE LE
PRÉSENT POUR PERMETTRE L'AVENIR
par Cassiopée Galy

ESPACE

- 79 MAIS QU'ALLONS-NOUS FAIRE
LÀ-BAS ?
par Michel Viso
- 84 CONTRIBUTION DE DEDALOS
À LA PROPULSION ÉLECTRIQUE
DANS LE SYSTÈME SOLAIRE
par Konstantinos Katsonis

DÉFENSE

- 87 LE COMMANDEMENT DE L'ESPACE
par Jean-Pierre Sanfourche

FORMATION

- 93 HACKATON ACTINSPACE 2020 :
RETOUR SUR LA PREMIÈRE ÉDITION
MARSEILLAISE
par Rachid Alhiane

VIE 3AF

- 99 ÉLÉMENTS DE PILOTAGE D'AÉROCLUB
par Patrick Gilliéron

HISTOIRE

- 111 HISTORIQUE DES KÉROSÈNES
par Mickaël Sicard

NOTES DE LECTURE

- 115 STABILIZATION AND DYNAMIC OF
PREMIXED SWIRLING FLAMES
PREVAPORIZED, STRATIFIED, AND
FULLY PREMIXED REGIMES DE PAUL
PALIES
par Thierry Schuller
- 116 JULES VÉDRINES, 250 000 KM EN
AÉROPLANE PAR THIERRY MATRA AUX
ÉDITIONS LES ÉTABLISSEMENTS
par Bernard Vivier
- 118 LES CHEVALIERS DU CIEL – TANGUY VS
LAVERDURE PAR PATRICE BUENDIA ET
FRÉDÉRIC ZUMBIEH
par Bruno Chanetz

ÉVÉNEMENTS 3AF

- 119 LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS



ÉDITORIAL

Il y a 60 ans, le 12 avril 1961, Youri Gagarine, renouvelant l'exploit de Magellan, réussissait le tour de la terre ... depuis l'espace, faisant entrer le monde dans un nouvel âge. Aujourd'hui l'espace est devenu hautement stratégique, comme en témoignent la mise en place du commandement « Espace » de l'Armée de l'air et de l'espace à Toulouse et le premier exercice spatial de défense, Aster-X, évoqués dans notre rubrique *Défense*. Au début de cette Lettre, Jean-Pierre Sanfourche interviewe Philippe Steininger, conseiller militaire du président du CNES, sur le lancement le 29 décembre 2020, du deuxième satellite – CSO-2 – de la *Composante spatiale optique*. La rubrique Espace offre un zoom sur SuperCam, la caméra du module *Persévérance* destinée à observer Mars, ainsi que la contribution à la propulsion électrique dans le système solaire d'une petite entreprise grecque, DEDALOS. Son fondateur, Konstantinos Katsonis, est membre de la 3AF. Comme trois autres auteurs d'articles de ce numéro, il fait partie de nos adhérents exerçant leur activité professionnelle à l'étranger et contribuant ainsi au rayonnement international de la 3AF.

Le premier *Point de vue* de cette Lettre est une synthèse, par Stéphane Andrieux, directeur scientifique général de l'ONERA, d'un document de l'Académie des technologies : *Irruption de l'IA, déluge des données : quelles perspectives pour la simulation à haute performance ?* Dans la rubrique *Aéronautique*, un éclairage sur *La Mécanique des fluides numériques dans les années 2020* est donné par Philippe Spalart, Français expatrié aux États-Unis et membre de la 3AF, dont les travaux dans la modélisation de la turbulence sont une référence mondiale.

Plusieurs articles de ce numéro sont consacrés à la réduction de l'empreinte carbone de l'aviation. Deux *Points de vue* ouvrent ce dossier. Le député Michel Delpon, surnommé *Monsieur Hydrogène* par ses pairs à l'Assemblée, présente le *comité national hydrogène*. Stéphane Cueille (SAFRAN) décline ensuite les différentes pistes pour parvenir aux objectifs assignés au motoriste en termes de réduction des émissions de dioxyde de carbone. L'article de Philippe Novelli (ONERA) sur *les carburants alternatifs et les énergies primaires* fait écho à ces préoccupations en complétant ce point de vue par une argumentation technique. Contrepoint de cet article, Mickaël Sicard (ONERA), dans la rubrique *Histoire* rappelle *l'historique du kérosène*. Les plans de relance européens et nationaux en

faveur de la transition écologique sont relayés localement par les régions, telle l'Occitanie qui s'implique fortement en créant un pôle hydrogène vert avec divers partenaires. Nicolas Bertier (ONERA) en présente la feuille de route. Enfin Paul Palies (université du Tennessee) approfondit le concept de *l'hydrogène pour l'aviation* en traitant les problèmes de la combustion, de l'injecteur et de leur mise en œuvre. Paul Palies, membre 3AF en poste aux États-Unis, est également l'auteur d'un livre de référence décrivant les progrès réalisés dans l'architecture des foyers de combustion aéronautiques, objet d'une note de lecture par Thierry Schuller, professeur à l'université Paul Sabatier de Toulouse.

Afin de réduire la consommation de carburant – quel qu'il soit – Michel Aguilar propose un nouveau concept de moteur : le *thermoréacteur™*, un moteur où la combustion se fait à volume constant. Ce moteur est conçu pour équiper X-plorair™, un s-UAM ou proche véhicule urbain aérien, dévoilé dans cette Lettre. Cependant notre dossier débute par un article plus général par Arnaud Le Pape, Henry de Plinval et Jean Hermetz (ONERA), présentant la problématique de la mobilité à la demande (ODM), de la mobilité urbaine aérienne (UAM), dans laquelle s'inscrit X-plorair, et de la mobilité aérienne avancée (AAM), dont le projet d'avion électrique Ampere de l'ONERA est une illustration, tout comme l'Avion Mauboussin, conçu par David Gallezot et présenté par Benjamin Deveaux.

Le secteur de la mobilité urbaine aérienne est en effet en pleine effervescence. *Choose Paris Region*, l'agence de promotion et d'attractivité internationale de la Région Île-de-France, la RATP et les Aéroports de Paris (ADP) ont lancé un appel d'offre pour développer la mobilité urbaine aérienne. Des industriels, tels qu'Airbus et Dassault Aviation, et des start-up ont été sélectionnés, en tout trente entreprises spécialisées, pour mener des expérimentations sur l'aérodrome de Pontoise dès juin 2021. Il est même prévu, lors des Jeux olympiques de 2024, des démonstrations d'avions à décollage et atterrissage vertical (VTOL).

La voiture volante a fait rêver les enfants. Qui ne se souvient de Fantomas ¹ s'envolant dans les années 70 à bord d'une DS dont les ailes se déploient, laissant ses poursuivants – Jean Marais et Louis de Funès – au sol dans leur Jeep ? Mais comme toujours l'origine est bien

1. <https://www.facebook.com/FansdeFunes/videos/la-ds-volante-fant%C3%B4mas/351435875909258/s>

ÉDITORIAL (SUITE)

plus ancienne. Il y a déjà un siècle, en 1921, René Tampier présentait au 7e salon de l'aéronautique au Grand-Palais son avion-automobile, un biplan aux ailes rétractables, convertible en automobile, roulant la queue en avant et l'hélice en arrière.



L'aviation et l'automobile ont des exigences communes, telle la réduction de la traînée aérodynamique. Olivier Cadot, membre 3AF professeur à l'université de Liverpool, nous fait part de ses recherches effectuées tant en France qu'au Royaume-Uni, concernant le *Morphing d'arrière-corps pour réduire la traînée des véhicules terrestres*.



LE MOT DU PRÉSIDENT

Chers Amis,

La crise sanitaire traîne en longueur et il est difficile de savoir quand nous en sortirons. Même si les associations, les industriels, les universités et instituts, les administrations sont organisées en conséquence, les voyages et les vraies rencontres se font rares. Conférences et congrès sont soit repoussés, soit annulés, soit tenus en « distanciel ». Les systèmes de visioconférence assurent avec plus ou moins de bonheur ces rencontres essentielles pour nos relations avec le monde aéronautique et spatial. Elles sont un prodigieux véhicule de rayonnement du savoir et elles permettent à la 3AF de se faire connaître tant en France qu'à l'international. Pour certains c'est une bonne opportunité de participer à frais réduits à ce type d'évènement et d'en découvrir tout l'intérêt.

Les grands congrès internationaux ont adopté les solutions qui leur paraissent le mieux adaptées pour les mois qui viennent, permettant en général d'y être présent ou d'y assister en ligne. Ainsi la fin de l'année sera chargée :

Notre rubrique *Aéronautique* se clôt par des articles de lauréats des Prix 3AF décernés en 2020 : la détection des impacts par surveillance vibratoire par Dimitri Goutaudier qui a reçu le prix *jeunes actifs* et la fabrication additive métallique par Cassiopée Galy, qui a reçu le prix *thèse*.

La rubrique *Formation* revient sur le sujet Espace qui ouvre ce numéro avec un article du groupe 3AF Provence qui a co-organisé la première édition marseillaise du Hackaton ActInSpace 2020.

À l'heure où « L'aérien ne doit plus faire partie des rêves d'enfants » (*dixit* la maire de Poitiers le 29 mars 2021), Patrick Gilliéron, membre de la commission Aviation légère et machines dérivées, nous fait part de son expérience de président d'aéroclub dans un article intitulé *Éléments de pilotage d'aéroclubs*.

Enfin, cette Lettre s'achève par deux autres notes de lecture : la biographie de l'aviateur *Jules Védrines*, héros de la Grande Guerre et le dernier album des *Chevaliers du Ciel*, autre rêve d'enfant ...

■
Bruno Chanetz

rédacteur en chef et président du Haut conseil scientifique

- le congrès ICAS (*International Council of Aeronautical Sciences*) de 2020, repoussé d'un an, se tiendra du 6 au 10 septembre à Shanghai (<https://www.icas.org/>)
- Le congrès de l'IAF (*International Astronautical Congress 2021*) est maintenu à Dubaï du 25 au 29 octobre prochain (<https://www.iafastro.org/events/iac/iac-2021/>)
- Le congrès du CEAS (*Council of European Aerospace Societies*) Aerospace Europe 2021 aura lieu à Varsovie du 23 au 26 novembre (<https://ceas.org/aerospaceeurope-2021-conference/>)

La 3AF est partie prenante dans toutes ces instances et elle tient à œuvrer pour la réussite de ces manifestations qui participent à son rayonnement international. Pierre Bescond, membre du bureau de notre association, anime et coordonne toutes ces relations internationales.

Nos adhérents à l'étranger contribuent aussi fortement à notre rayonnement et je remercie chaleureusement Olivier Cadot (GB), Konstantinos Katsonis (Grèce), Paul Palies (USA) et Philippe Spalart (USA) d'avoir participé à cette Lettre. Bonne lecture.

■
Louis Le Portz
président de la 3AF

INTERVIEW

LA COMPOSANTE SPATIALE OPTIQUE : INTERVIEW DU GÉNÉRAL PHILIPPE STEININGER, CONSEILLER MILITAIRE DU PRÉSIDENT DU CNES

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



Philippe Steininger

Diplômé de l'École de l'air et breveté pilote de chasse, Philippe Steininger a servi au sein de plusieurs unités opérationnelles de l'Armée de l'air et a été amené à participer à des opérations en Afrique, dans les Balkans et au Proche-Orient. Son parcours au sein de l'Armée de l'air l'a vu commander un escadron de chasse, une base aérienne et les Forces aériennes stratégiques.

Philippe Steininger a également servi dans diverses entités de l'administration centrale du ministère de la Défense, ainsi qu'au sein du Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN) où il a été successivement conseiller du Secrétaire général, chargé du secrétariat des conseils de défense et de sécurité nationale, et secrétaire général adjoint de la défense et de la sécurité nationale.

Il a terminé sa carrière militaire en 2018 et a rejoint le CNES en tant que conseiller militaire du président.

Jean-Pierre Sanfourche : Deux ans après CSO-1, le premier satellite de la Composante spatiale optique qui avait été lancé le 19 décembre 2018, le deuxième satellite de cette Composante a été lancé avec succès le 29 décembre 2020. Le troisième et dernier satellite de la Composante, CSO-3, est prévu pour être lancé en 2022. Peut-être pour commencer notre entretien pourriez-vous rappeler la logique d'ensemble du programme CSO ?

Philippe Steininger : Le système CSO a vocation à prendre la relève des deux satellites militaires Helios II actuellement en service avec pour mission de recueillir du renseignement stratégique et de fournir un appui aux opérations interarmées et à la géographie militaire.

La constellation CSO prévoit trois satellites identiques évoluant sur une orbite polaire héliosynchrone ; deux à 800 kilomètres pour la mission de reconnaissance – CSO 1 et 3 – et un à 480 kilomètres pour la mission d'identification, en l'occurrence CSO-2 lancé en décembre dernier. Le premier CSO est opérationnel, le deuxième est en phase de recette en vol et fournit déjà des images d'une qualité très impressionnante et le troisième les rejoindra en orbite en 2022.



CSO. ©Mira-Rémy Parot.

Mission : Observation de la Terre à usage militaire
Date de lancement : À partir de 2018 (3 lancements dédiés)

Partenaires : DGA (Direction Générale de l'Armement), maître d'ouvrage

Instruments : Télescope de grande dimension, capteurs opérant dans les domaines visible et infrarouge
Position : Orbite basse héliosynchrone phasée, altitude comprise entre 480 et 800 km en fonction de la mission
Durée de vie : Minimum 10 ans

INTERVIEW

LA COMPOSANTE SPATIALE OPTIQUE : INTERVIEW DU GÉNÉRAL PHILIPPE STEININGER, CONSEILLER MILITAIRE DU PRÉSIDENT DU CNES

JPS : Comment la campagne CSO-2 s'est-elle déroulée ? L'entrée en opération de CSO-2 s'est-elle déroulée conformément aux spécifications ?

PS : La crise sanitaire et divers incidents ayant affecté le lanceur Soyouz ont retardé le lancement de CSO-2 qui est resté plusieurs mois stocké au Centre spatial guyanais en attente de son tir. Celui-ci a finalement eut lieu le 29 décembre 2020 et s'est parfaitement déroulé.

Depuis son lancement, CSO-2 subit une série d'opérations permettant de configurer et activer diverses fonctions de la plateforme et de l'instrument de prise de vues pour progressivement amener le satellite sur une orbite définitive et accéder à la pleine capacité opérationnelle. Ces opérations, dites de « recette en vol », arrivent à leur fin et l'exploitation opérationnelle du satellite va pouvoir débuter.

Les images acquises par CSO-2, tant dans les bandes spectrales visibles qu'en infrarouge, sont d'excellente qualité et offrent un niveau de résolution et une capacité d'acquisitions inégalées en Europe. Le satellite dans son ensemble et son segment sol fonctionnent de manière

nominal, ce qu'il faut porter au crédit de tous ceux qui ont œuvré pour atteindre ce remarquable résultat, qu'il s'agisse des équipes du CNES, de la DGA ou des industriels concernés.

JPS : Les satellites Hélios II-A et II-B sont-ils encore exploités ?

PS : Les satellites Hélios II-A et II-B ont été lancés respectivement en décembre 2004 et décembre 2009 et sont toujours opérationnels. Ils fournissent à la défense des services d'imagerie très haute résolution et infrarouge très appréciés. Leur fin de vie approche néanmoins alors que la constellation CSO se met en place. Il n'y a donc aucun risque de rupture capacitaire dans le domaine de l'acquisition depuis l'espace de renseignements d'origine image.

JPS : Pourrions-nous résumer les grandes avancées technologiques de CSO par rapport à Hélios II ?

PS : De manière très schématique, CSO apporte les mêmes services qu'Hélios II avec un gain de performances très net, si bien qu'il est désormais possible avec CSO de



Lancement du satellite français CSO-2 par la fusée Soyouz #VS25 le 29 décembre 2020



CSO-2

détecter des éléments d'intérêt, comme avec Helios II, mais aussi d'en comprendre la nature et de les identifier. Par rapport à son prédécesseur, CSO offre ainsi une image couleur et plus résolue, une détection infrarouge très améliorée et un géoréférencement des images d'une précision accrue. Ces améliorations, permises par une charge utile parmi les plus évoluées au monde, sont par ailleurs servies par les performances exceptionnelles de la plateforme. Des actionneurs gyroscopiques de très hautes performances confèrent en effet à celle-ci une agilité remarquable. Il en résulte des avantages opérationnels incontestables comme de permettre des modes de prise de vue multiples (couples stéréo, triplet stéréo, mosaïque en une seule passe) et aussi de prendre un très grand nombre d'images (plusieurs centaines chaque jour). Doté d'un contrôle d'orbite autonome, CSO calcule et décide par ailleurs lui-même des manœuvres à effectuer pour se maintenir correctement à poste sans impact négatif sur la mission. Il s'agit là d'une innovation qui simplifie substantiellement la tâche des opérateurs sol.

JPS : Comment le programme CSO est-il intégré au sein du Commandement de l'Espace ?

PS : Le système CSO ne fait pas exception au sein des systèmes spatiaux militaires de renseignement s'agissant de sa mise en œuvre. L'état-major des armées (EMA), au travers de la Direction du renseignement militaire (DRM) et du Commandement de l'espace (CDE), en est l'autorité d'emploi.

Les opérateurs du CNES, en étroite coordination avec le CDE, transmettent aux satellites CSO les données nécessaires à leur maintien à poste, à la préservation dans le temps de leurs performances, à d'éventuelles manœuvres d'anticollision, ainsi que les plans de missions élaborés par les armées.

Ayant vocation à s'impliquer de plus en plus dans les opérations spatiales, le CDE est engagé dans une phase d'acquisition de compétences au contact du CNES, qui forme son personnel et intègre certains d'entre eux à ses équipes.

INTERVIEW

LA COMPOSANTE SPATIALE OPTIQUE : INTERVIEW DU GÉNÉRAL PHILIPPE STEININGER, CONSEILLER MILITAIRE DU PRÉSIDENT DU CNES

JPS : Comment les données de CSO sont-elles exploitées au sein du Centre militaire d'Observation par Satellites (CMOS) de Creil ? Comment le CMOS est-il organisé ?

PS : Créé en 1995 concomitamment avec la mise en service du satellite Helios I, le Centre militaire d'observation par satellites (CMOS) regroupe à Creil l'ensemble des moyens de mise en œuvre de l'observation spatiale militaire française et acquiert la totalité de l'imagerie commerciale au profit de la défense. Cette unité d'environ 120 personnes, qui relève du CDE, est responsable de la satisfaction du besoin opérationnel des organismes autorisés à recevoir des produits d'origine spatiale (images, écoutes) et suit l'état des systèmes spatiaux.

S'agissant plus particulièrement du système CSO, le CMOS élabore les plans de prises de vues que le CNES se charge ensuite de télécharger à bord des satellites en orbite depuis son site de Toulouse. Après réception des images sur la station de Kiruna située en Suède, le CMOS en assure ensuite la diffusion vers les entités bénéficiaires.

JPS : Le Centre satellitaire de l'Union européenne (CSUE) SatCen de Madrid/Torrejon participe-t-il à l'exploitation de CSO ?

PS : Le SatCen n'est pas à ce stade associé à l'exploitation du système CSO dont la production est réservée à la France et à certains pays partenaires au titre d'un accord spécifique.

JPS : Le programme CSO est-il pris en compte dans l'organisation « MUSIS » (Multinational Space Imaging for Surveillance) ?

PS : En 2006 a été lancée l'initiative européenne MUSIS (*Multinational Space-based Imaging System*) visant à offrir à ses promoteurs (France, Allemagne, Italie, Belgique, Espagne et Grèce) un accès fédéré à une nouvelle génération de satellites militaires optiques et radars d'observation de la Terre. Au sein de MUSIS, la France prenait la responsabilité de la réalisation de sa composante spatiale optique, dite CSO, sur la base d'un objectif d'état-major publié un an plus tôt.

Prenant acte de l'échec des partenaires de MUSIS à établir un accord de coopération et afin d'éviter toute rupture capacitaire dans le domaine du renseignement spatial, la France a été amenée en 2010 à lancer dans un cadre national le programme CSO. Celui-ci prévoyait à l'époque la réalisation de deux satellites, l'un pour conduire des missions de reconnaissance, l'autre d'identification. En 2015, un accord avec l'Allemagne a permis d'ajouter un troisième satellite au système CSO, moyennant une contribution financière allemande et un financement complémentaire français.

Le programme CSO est donc un programme national dont la dimension européenne doit toutefois être reconnue. Il n'est pas, comme ses prédécesseurs Hélios I et II, un programme mené en coopération multilatérale avec d'autres pays européens, mais il fait l'objet de plusieurs accords bilatéraux de coopération. Avec l'Allemagne, tout d'abord, qui a contribué financièrement au programme, et avec laquelle un accord d'échanges d'images a été conclu qui permettra à celle-ci de bénéficier de l'imagerie CSO et à la France des images de la constellation radar allemande SARah. Avec l'Italie ensuite, avec laquelle un accord de même nature a été conclu, mais aussi la Belgique, qui a apporté une contribution financière au programme et la Suède, dont le territoire accueille une station de télémesures pour CSO idéalement placée près du pôle. D'autres accords sont envisagés et la communauté CSO pourrait s'élargir à d'autres partenaires européens prochainement.

JPS : Un programme militaire d'Observation de la Terre post-CSO est-il en préparation ?

PS : Compte tenu de la durée des cycles de développement des programmes spatiaux militaires de très haute performance que nous évoquons, nous sommes en effet d'ores et déjà engagés dans la préparation de la génération « post-CSO ». La ministre des Armées a d'ailleurs publiquement annoncé, dès avant le tir de CSO-1, à l'occasion du Salon de l'air et de l'espace de 2019, le lancement du programme « Iris » destiné à prendre la relève de CSO vers 2030. ■

IRRUPTION DE L'IA, DÉLUGE DES DONNÉES : QUELLES PERSPECTIVES POUR LA SIMULATION À HAUTE PERFORMANCE ?

par Stéphane Andrieux, ONERA - Académie des Technologies



Stéphane Andrieux est diplômé de l'École nationale des ponts et chaussées, docteur ingénieur et habilité à diriger les recherches. Il est directeur scientifique général de l'ONERA, après une carrière à la recherche d'EDF, où il a été directeur scientifique. Prix Ernest Déchelle de l'Académie des sciences en 2006, il est membre de l'Académie de technologies. Il est professeur à l'École des ponts ParisTech où il a publié un ouvrage.

LE NOUVEAU RAPPORT DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

La récente publication de l'Académie des technologies actualise son précédent rapport de 2005^b qui s'était centré sur la simulation numérique à haute performance, ses enjeux et ses applications.

Depuis cette date pourtant récente, que de révolutions :

- nombreux succès d'une nouvelle génération d'intelligence artificielle et tout particulièrement ceux de l'apprentissage profond ;
- développement concomitant de l'accès à des quantités de données, recueillies ou produites à un niveau historiquement inégalé ;
- sentiment d'atteindre les limites physiques des concepts de micro-processeurs dominants et prise en considération de leur nécessaire sobriété énergétique ;
- apparition de nouvelles architectures informatiques (hétérogènes, petaflopiques/exaflopiques, etc.);
- enfin, application de la simulation numérique à des systèmes toujours plus complexes dans de nombreux champs applicatifs, parfois nouveaux.

Tout cela a conduit l'Académie à réexaminer en profondeur les enjeux, les opportunités et les risques de la simulation numérique dans sa dimension de haute performance et en relation avec la science des données. En effet, si l'intelligence artificielle et l'apprentissage profond apporteront au scientifique et à l'ingénieur un ensemble de nouvelles méthodes qui permettent de mieux reproduire, comprendre et prévoir le fonctionnement de très nombreux systèmes complexes tant scientifiques qu'industriels, environnementaux, de



santé, etc. les usages de la simulation, dans des domaines où des « garanties » sont exigées par les diverses parties prenantes, nécessitent une attention particulière. Par ailleurs, on ne dispose que de peu de recul sur ces technologies et il faut se garder de se laisser séduire trop vite par les succès enregistrés dans des domaines connexes mais très différents de ceux qu'abordent la simulation des systèmes physiques, cyber-physiques voire sociaux-physiques.

L'Académie des technologies fait le point sur le contexte de ces développements, et son groupe de travail a auditionné plus d'une quinzaine de personnes : spécialistes des machines et des données, chercheurs, industriels de secteurs variés, et pour le secteur aéronautique, la sous-direction de la construction aéronautique de la DGAC. Six recommandations se dégagent :

1. Développer des méthodes hybrides, associant physique de base et apprentissage.
2. S'appuyer sur la convergence des infrastructures pour le calcul et les données.

POINT DE VUE

IRRUPTION DE L'IA, DÉLUGE DES DONNÉES : QUELLES PERSPECTIVES POUR LA SIMULATION À HAUTE PERFORMANCE ?

3. Mieux valider, qualifier et expliquer les résultats des simulations.
4. Organiser un meilleur partage des données entre les utilisateurs potentiels.
5. Promouvoir une formation hybride adaptée et bien reconnaître les métiers associés.
6. Aider à la transition des grands codes.

Le spectre couvert par les recommandations est très large, puisqu'il s'étend des machines de calcul et leurs middlewares, aux conditions de réussite, notamment sur le partage des données, jusqu'à l'indispensable évolution des compétences. Sur certaines d'entre elles, des progrès sont enregistrés depuis quelques mois, c'est le cas du « risque » de séparation matérielle entre le monde du traitement des données massives et celui du calcul intensif. Comme le montre le tableau suivant la situation de 2017 était préoccupante du fait du risque induit par la très forte montée en puissance de la demande pour des machines dédiées au traitement de données massives qui aurait pu conduire à un désintérêt des constructeurs pour les machines du calcul haute performance.

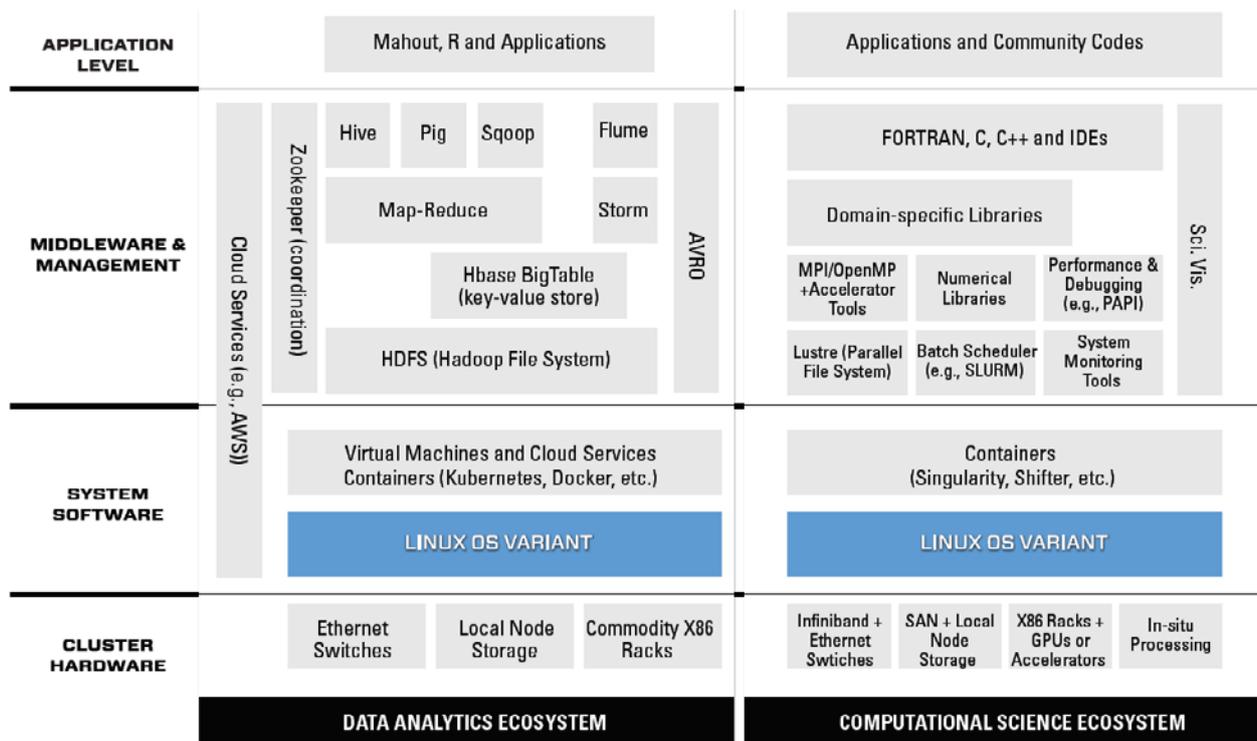
Il est désormais acquis que les deux mondes, du HPC (*High Performance Computing*) et du HPDA (*High*

Performance Data Analytics), ont tout intérêt à collaborer afin de mettre à disposition, et exploiter de façon croisée, les meilleures technologies. Des initiatives comme EuroHPC ^d ou encore Gaia-X ^e, le démontrent, elles s'attaquent également à la question cruciale de la souveraineté technologique européenne dans ces domaines. Le 46^{ème} forum (en avril 2021) de l'association ORAP, ORganisation Associative du Parallélisme, créée en 1994, est dédié à ces questions, puisqu'il s'intitule « Calcul haute performance : vers une hybridation avec l'IA ? ».

LA QUESTION CRUCIALE DE LA VALIDATION DES MODÈLES ET DES SIMULATIONS

Comme précisé dès l'introduction du rapport de l'Académie, la question centrale qui nourrit les réflexions et les recommandations peut se formuler de la façon suivante : comment articuler, d'une part, données, information et connaissance, et d'autre part, causalité et corrélation ?

Il est en effet vital lorsque l'on utilise la simulation numérique tant pour comprendre que pour dimensionner, justifier, ou de façon générale « décider », que les principes de la modélisation, ceux de leur validation



Les différents types de logiciels utilisés pour le traitement des données massives ⁹ (HPDA, à gauche) et le calcul scientifique (HPC, à droite)

IRRUPTION DE L'IA, DÉLUGE DES DONNÉES : QUELLES PERSPECTIVES POUR LA SIMULATION À HAUTE PERFORMANCE ?

et de leur domaine d'emploi soient explicités mais aussi analysables. De même que la qualité des données utilisées, qu'elles soient massives (et sujettes à des biais^f) ou au contraire plus parcimonieuses (et sujettes à caution quant à la pertinence à s'y appuyer), puisse être objectivement mesurée et garantie. Le Secrétariat général pour l'investissement vient ainsi de lancer le grand défi *sécuriser, certifier et fiabiliser les systèmes fondés sur l'intelligence artificielle*^g, qui vise à *assurer la transparence et l'auditabilité des systèmes autonomes [...] en développant les capacités nécessaires pour observer, comprendre et auditer leur fonctionnement et [démontrer] le caractère explicable de leur fonctionnement*. Dans le domaine de l'ingénierie des systèmes physiques, une démarche similaire serait à entreprendre.

Les techniques d'apprentissage constituent indéniablement un levier considérable de progrès pour la simulation haute performance. On peut ainsi espérer gagner en précision, en adaptabilité mais aussi en vitesse de résolution, en exploitant également l'IA pour améliorer les algorithmes, les heuristiques ou même la pratique d'estimation des paramètres intervenant à toutes les étapes du processus de calcul. Mais le succès de ces techniques dans d'autres domaines, notamment ceux où l'émergence d'un formalisme équationnel pour représenter la réalité que l'on cherche à appréhender est, soit impossible, soit extrêmement coûteux (par exemple pour de nouveaux domaines de modélisation de phénomènes couplés et non linéaires), ne doit pas nous faire oublier l'obligation de prudence et de rigueur si l'on vise des domaines applicatifs à forts enjeux de « garanties ». Au-delà de la nécessaire recherche de l'explicabilité des méthodes et des résultats produits, tout particulièrement par l'apprentissage profond pour lequel subsistent des phénomènes mal expliqués^h, deux questions méritent d'être soulevées.

INFÉRENCE STATISTIQUE ET GRANDE DIMENSION

La première concerne les fondements au processus d'inférence statistique au cœur des méthodes d'apprentissage, processus qui désigne la démarche de prédiction à partir d'un échantillon de données. On en connaît depuis longtemps les risques et les précautions à prendre que ce soit pour la validation, et l'extrapolation des résultats, et l'on rencontre fréquemment en pratique la difficile maîtrise du risque de surapprentissage (overfitting). Ces techniques remontent à plus

d'un siècle^{ij}, cependant l'explosion de la dimension des espaces dans lesquels s'effectue cette inférence, qu'il s'agisse de l'espace des données et de leurs descripteurs ou de celui des paramètres à identifier conduit à les réexaminer. Si l'on peut parler aujourd'hui dans les applications de quelques millions pour la dimension de ces espaces dans les cas extrêmes, et même si, dans les domaines qui nous intéressent, on est loin de ces valeurs mais où l'on peut atteindre quelques centaines ou milliers de paramètres, on est confronté à une forme géométrique de la malédiction de la dimension.

En particulier, les notions de distance, de voisinage et même d'échantillonnage, à la base des processus d'inférence statistique, prennent une tournure très contre-intuitive. Par exemple, si l'on échantillonne de façon statistiquement uniforme un cube d'arête $2r$ et que l'on cherche à estimer le pourcentage de points qui se trouveront à une distance inférieure à r du centre (qui serait le point d'intérêt), ce pourcentage qui est de 78% en dimension 2 n'est déjà plus que de 0.25% en dimension 10. Les « proches voisins » sont très éloignés dans les espaces de grande dimension !

La malédiction géométrique de la dimension

- Le rapport ρ entre le volume de la sphère inscrite dans un cube et le volume de celui-ci tend extrêmement rapidement vers zéro lorsque la dimension d augmente (si $d=2n$, $\rho = \pi^n / n2^n n!$)

En dimension 8, la sphère n'occupe que 2% du cube, en dimension 40, ce n'est plus que $3,3 \cdot 10^{-19}$ %.

- La distance des « coins » d'un cube d'arête 2 au centre de celui-ci est la racine de la dimension de l'espace. Ainsi en dimension 100 chaque « coin » du cube est dix fois plus éloigné du centre que les points situés sur la sphère inscrite.

LES APPORTS DE L'ANALYSE MATHÉMATIQUE DES MODÈLES ÉQUATIONNELS

La seconde question porte sur l'affaiblissement de la puissance descriptive et prédictive qu'apportait le format équationnel des modèles. Grâce aux outils de l'analyse mathématique développés depuis deux siècles, il a été possible d'analyser les modèles, qu'ils se présentent sous forme d'équations différentielles ou d'équations aux

POINT DE VUE

IRRUPTION DE L'IA, DÉLUGE DES DONNÉES : QUELLES PERSPECTIVES POUR LA SIMULATION À HAUTE PERFORMANCE ?

dérivées partielles. Ces analyses, notamment qualitatives, permettent d'en comprendre la portée, les instabilités, la propagation de l'information ou des incertitudes, et la capacité à prédire, d'étudier les comportements « aux limites », ou encore de prévoir les difficultés de la simulation numérique.

Comme le rapport de l'Académie le souligne, on ne peut exploiter les potentialités de l'apprentissage par les données dans des domaines où la sûreté est l'élément clé, sans profondément revoir les conditions de démonstration, de preuve et de confiance associées aux applications visées et à l'élaboration de la prise de décision. Ces techniques et leur assimilation sont encore extrêmement jeunes quand on les compare à la durée qui nous sépare des premières simulations numériques : il y a indéniablement un effort collectif à mener pour les faire mûrir.

UNE RÉVOLUTION POUR LA VALIDATION ?

Pour toutes les raisons qui viennent d'être évoquées, il n'est pas concevable d'imaginer dans le futur que la validation ne s'appuie que sur les techniques de validation croisée sur un même échantillon, et partitionné en échantillon de test et échantillon d'apprentissage, telles qu'elles sont aujourd'hui pratiquées par les communautés de l'apprentissage profond du traitement d'image ou de la parole. Également parce que le volume de données utilisable (ou engendable) pour la modélisation et la simulation haute performance est sans commune mesure avec celui de ces communautés¹.

Il sera indispensable de trouver les moyens de prendre en considération dans le mécanisme d'apprentissage, toute la connaissance a priori disponible, à l'image de ce qui est devenue la règle dans le traitement des problèmes inverses ou plus généralement des problèmes mal posés. C'est la raison pour laquelle il faut résolument soutenir le développement des approches « basées sur la physique » (*physically informed*) qui tentent d'incorporer des contraintes résultant d'une connaissance préalable. Les garanties à apporter peuvent être de nature très variable, on peut citer par exemple celle de la satisfaction absolue d'équations de conservation. Il faut plus simplement considérer que les grandes masses de données ne doivent permettre que de corriger et d'adapter un modèle, et non en être l'unique source dès lors qu'une connaissance

préalable existe. De nouveaux concepts méthodologiques pour la validation devront apparaître sur cette base. Contrairement à ce qui a pu être prédit il y a maintenant plus de dix ans, le déluge de données n'est pas la fin de la théorie¹.

Au-delà de la validation des modèles et de leur simulation, mais également des garanties qui doivent être apportées sur la conception des systèmes, leur résilience face aux situations extrêmes de toute nature, et la prévisibilité de leurs comportements, tout particulièrement face à des conditions non rencontrées par le passé ou non prévues, c'est la perspective de certification virtuelle qui doit nous pousser à traiter avec rigueur les questions qui viennent d'être soulevées. Il est extrêmement probable que cela nécessitera un volume supplémentaire très significatif de calcul avec peut-être de nouveaux types de simulations. Il est en effet vital de bien distinguer la validation des méthodes et la validation des résultats, validations qui prennent désormais un éclairage nouveau.



Les 8 défis de la feuille de route IA relatifs à la fiabilité et la confiance dans l'apprentissage machine :

1. Cadres traditionnels d'assurance qualité du développement non adaptés à l'apprentissage machine.
2. Difficultés à conserver une description complète de la fonction prévue.
3. Manque de prévisibilité et d'explicabilité du comportement des applications d'apprentissage machine.
4. Manque de garantie sur la robustesse et l'absence de "fonction non intentionnelle".
5. Absence de méthodes normalisées pour évaluer les performances opérationnelles des applications en Machine Learning et Deep Learning.
6. Question du biais et de la variance dans les applications de machine learning.
7. Complexité des architectures et des algorithmes.
8. Processus d'apprentissage adaptatif.

¹ La base de données ImageNet9k, contient 14 millions d'images annotées manuellement, 20 000 étiquettes indiquant quel objet est représenté sur une image

IRRUPTION DE L'IA, DÉLUGE DES DONNÉES : QUELLES PERSPECTIVES POUR LA SIMULATION À HAUTE PERFORMANCE ?

Références

- a. <https://www.academie-technologies.fr/blog/categories/publications-de-l-academie/posts/calcul-et-donnees-nouvelles-perspectives-pour-la-simulation-a-haute-performance-rapport>
- b. Enquête sur les frontières de la simulation numérique. La situation en France et dans le monde, diagnostics et propositions , rapport de l'Académie des technologies, Juin 2005
- c. Asch, M., Moore., T Eds , *Big data and extreme-scale computing - Pathways to Convergence-Toward a shaping strategy for a future software and data ecosystem for scientific inquiry* . Int . J . High Performance Comp . App . , 32 (4) , 435 - 479, 2018
- d. <https://eurohpc-ju.europa.eu/>
- e. <https://www.data-infrastructure.eu/GAIA/Navigation/EN/Home/home.html>
- f. A . Torralba et A .A . Efros , *Unbiased look at dataset bias*, CVPR 2011, Providence, RI, 2011 , pp . 1521-1528, doi: 10 .1109/CVPR .2011 .5995347]
- g. <https://www.gouvernement.fr/decouvrir-les-grands-defis>
- h. C. Szegedy, W. Zaremba, I. Sutskever, J. Bruna, D. Erhan, I. Goodfellow, and R. Fergus, *Intriguing properties of neural networks*, in Proc. Int. Conf. Learning Representations, 2014
- i. Pearson, K. (1900). *On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling*. Philos. Magazine, 5th Series 50 157-175. Reprinted in Karl Pearson's Early Statistical Papers (1948) 339-357 Cambridge Univ. Press.
- j. Fisher, R.(1925) *Theory of Statistical Estimation*, Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, vol. 22, no 5,, p. 700-725
- k. <https://devopedia.org/imagenet>
- l. <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/fourth-paradigm-data-intensive-scientific-discovery/>
- m. <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/news/easa-publishes-joint-report-learning-assurance-neural-networks> ■

L'HYDROGÈNE SUR ORDONNANCE LE COMITÉ NATIONAL HYDROGÈNE

par Michel Delpont, Député de la Dordogne, Co-président fondateur du Groupe d'études hydrogène à l'Assemblée nationale. Membre de la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire.



Michel Delpont est député de la Dordogne (Bergerac). Il est très engagé sur les questions économiques liées à la transition énergétique. Son travail pour voir émerger une filière française et européenne de l'hydrogène en a fait un spécialiste reconnu du personnel politique à tel point que l'Assemblée l'a surnommé "Monsieur hydrogène".

LA PREMIÈRE RÉUNION DU CONSEIL NATIONAL DE L'HYDROGÈNE A PERMIS DE RÉALISER UN POINT D'AVANCEMENT DU PLAN HYDROGÈNE FRANÇAIS.

Le Conseil national de l'hydrogène s'est réuni pour la première fois ce jeudi 25 février 2021. Co-présidée par Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique, Bruno Le Maire, ministre de l'Économie, des Finances et de la Relance, et Agnès Pannier-Runacher, ministre déléguée à l'Industrie, cette première réunion a permis de réunir les différents acteurs de la filière pour la réalisation d'un premier point d'étape.

DE NOMBREUX PROJETS HYDROGÈNE DÉJÀ ENGAGÉS

Alors que le gouvernement compte mobiliser 7 milliards d'euros pour développer la filière hydrogène

française, les différentes parties prenantes ont souligné la forte dynamique industrielle du secteur.

Sur ce point, en matière d'investissements, de nombreux financements ont déjà été engagés (voir Figure 1)

- Dans le cadre de France Relance, **27 projets de R&D et d'intégration de technologies hydrogène** ont d'ores et déjà été soutenus.
- Début 2021, un soutien financier a été annoncé pour aider 4 régions (Occitanie, Bourgogne-Franche-Comté, Auvergne-Rhône-Alpes, Grand-Est) à **investir dans le train à hydrogène**. Au total, 14 rames seront financées pour un investissement total de 300 millions d'euros.
- Sur le premier volet de l'appel à projets « **écosystèmes territoriaux** » opéré par l'Agence de la transition écologique (ADEME), 7 projets, représentant un investissement de 136 millions d'euros et une demande d'aide de 45 millions d'euros, ont été présélection-



Figure 1. Carte des projets financés.

nés. Toujours en cours, la deuxième session de l'appel à projets compte déjà plus de 47 nouvelles demandes ouvertes. La présélection aura lieu en juin.

Afin d'encourager l'émergence de nouvelles technologies, le Secrétariat général pour l'investissement a par ailleurs annoncé l'amélioration de l'appel à projets « briques technologiques et démonstrateurs hydrogène » opéré par l'ADEME. Les aides accordées peuvent ainsi désormais grimper jusqu'à 60 % des investissements éligibles, voire 75% sous certaines conditions.

ELECTROLYSE : 3.2 GW DE PROJETS IDENTIFIÉS

Alors que la production d'hydrogène vert constitue un axe fort du plan français, les industriels s'organisent. France Hydrogène a dénombré 4 projets d'usines en France de fabrication d'électrolyseurs et a identifié des installations d'électrolyse projetées sur une puissance totale de 3,2 GW. Cela correspond déjà à près de 50% de l'objectif fixé par la stratégie nationale qui vise à disposer d'une capacité d'électrolyse sur notre territoire de 6,5 GW en 2030.

L'HYDROGÈNE SUR ORDONNANCE : CATÉGORIES ET RÉGLEMENTATIONS EN COURS D'ÉLABORATION

Respectant un principe de neutralité technologique, les catégories proposées pour ces projets mettent en avant la source d'énergie primaire utilisée ou les émissions de gaz à effet de serre associées. La typologie inclut trois catégories qui se différencient par leur seuil d'émission d'équivalents de CO₂ émis par kilogramme d'hydrogène produit :

- L'hydrogène renouvelable, produit à partir de sources d'énergies renouvelables et dont le procédé de production a un faible seuil de kgCO₂ eq/kgH₂. Cette catégorie inclut aussi bien l'électrolyse utilisant de l'électricité renouvelable (solaire, éolien, hydraulique), que tout autre procédé de production recourant à des énergies renouvelables et « n'entrant pas en conflit avec d'autres usages permettant leur valorisation directe » (pyrogazéification ou thermolyse de la biomasse, vaporeformage de biogaz).
- L'hydrogène bas-carbone, produit à partir de sources d'énergies non renouvelables et respectant le même seuil de kgCO₂ eq/kgH₂. L'électrolyse alimentée par de l'électricité du mix électrique français serait qualifiée, ainsi que les procédés associant des techniques de captage, séquestration ou utilisation du carbone (CSUC)

pouvant réduire considérablement les émissions de CO₂ en sortie d'usine.

- L'hydrogène carboné, désigne un hydrogène ni renouvelable ni bas-carbone. Sont regroupées ici les productions par des énergies fossiles, telles que l'hydrogène produit par vaporeformage de gaz naturel (environ 11 kgCO₂ /kgH₂), par gazéification du charbon (20 kgCO₂ /kgH₂) ou encore par électrolyse alimentée par des mix électriques carbonés. Mais aussi potentiellement des productions à partir d'énergies renouvelables qui ne qualifieraient pas au seuil d'émission. Cela pourrait concerner par exemple de l'hydrogène produit à partir de biomasse ou de biogaz.

Restera donc à définir par voie réglementaire le seuil d'émission approprié. Un choix qui se fera en lien avec les discussions européennes autour de la taxonomie verte, et qui devrait être compatible avec un mix électrique décarboné. La méthode de calcul des émissions de gaz à effet de serre des différents procédés de production sera un autre point clef à déterminer, que l'ADEME a déjà étudié.

L'ordonnance inclut également dans son périmètre l'hydrogène co-produit (lors d'un processus de production tiers) et l'hydrogène autoconsommé. Un autre apport essentiel de l'ordonnance est d'instaurer deux systèmes pour la traçabilité de l'hydrogène, capables de renseigner sur l'origine de l'hydrogène. Comme pour l'électricité et le biogaz, le dispositif se base sur des garanties d'origine, qui pourront attester de l'origine renouvelable ou bas-carbone de l'hydrogène produit.

Une garantie d'origine permet de certifier une quantité d'hydrogène produit comme étant renouvelable ou bas-carbone. Elle peut être valorisée par le producteur et manifeste le soutien du consommateur à une filière de production vertueuse. Les modalités pratiques d'émission, d'échange, d'utilisation et d'annulation des garanties d'origine de l'hydrogène feront l'objet d'un décret relatif à la traçabilité, attendu pour le premier semestre 2021.

En parallèle, l'ordonnance introduit aussi des « garanties de traçabilité ». Celles-ci ne peuvent être échangées indépendamment des quantités auxquelles elles sont associées. Ce dispositif, plus exigeant, nécessite un suivi et une logistique plus conséquents. Différents types d'hydrogène peuvent en effet être mélangés au cours d'une phase d'acheminement, par exemple au niveau d'une canalisation dédiée. Reste la possibilité,

lors de l'échange de quantités, de convertir une garantie de traçabilité en garantie d'origine dans une pareille situation.

Un registre national tiendra à jour la gestion de ces deux garanties de production, valables douze mois, sous la responsabilité d'un organisme indépendant désigné par l'autorité administrative. Ce système doit également pouvoir accueillir les garanties délivrées par les partenaires européens conformément à la directive 2018/2001 relative aux énergies renouvelables.

Le but de ces lois et réglementations est de favoriser la création d'hydrogène renouvelable et bas carbone en s'appuyant sur un système de taxe ou de crédit d'impôts en faveur de ces technologies qui permettront de baisser les prix de l'hydrogène vert et d'orienter les consommateurs vers celles-ci.

OÙ EN SOMMES-NOUS EN FRANCE PAR RAPPORT À L'EUROPE ET L'INTERNATIONAL ?

Faisons un état des lieux, car nous allons le voir ce benchmark est stratégique.

Nous constatons trois choses. D'abord la dynamique fortement accélérée depuis 18 mois. Les chiffres sont éloquentes, puisque nous avons 30 pays qui ont annoncé aujourd'hui des stratégies hydrogènes. 75 pays soit 50% du GDP (PIB mondial) ont annoncé des stratégies zéro émission et des dates butoirs pour les énergies fossiles. La moitié d'entre eux ont basculé dans la technologie hydrogène. Ainsi plus de 200 projets hydrogène sont annoncés ce qui équivaut à 350 milliards de dollars d'investissements lourds, dont 80 milliards sont déjà planifiés ou en construction. Ce recensement révèle que 70 milliards de soutien global public d'amorçage ont déjà été fléchés sur l'hydrogène dans le monde et l'Europe est leader sur ces annonces.

En deuxième point, le passage à l'échelle exige des politiques publiques en parfaite synergie avec les programmes privés d'investissement. La puissance d'électrolyse nécessaire pour produire cet hydrogène au niveau mondial est conséquente. Ce qui doit faire appel à une Énergie décarbonée, qui sera essentiellement issue à terme des énergies renouvelables.

Le troisième facteur d'intérêt stratégique permettant d'être à parité de prix avec l'hydrogène fossile, c'est la baisse des coûts. La réduction des Capex, c'est-à-dire toutes les dépenses liées à l'investissement capitalisées dans le bilan, est estimée de 50 à 60% sur cette décennie. On est plutôt en avance par rapport à nos estimations réalisées il y a trois ans. De plus, produire de l'hydrogène n'est qu'une face apparente de l'iceberg : la face immergée, représente le mapping de la vingtaine d'usages à venir qui offrent les solutions de décarbonation les plus compétitives à l'horizon à 2030 (cf. mon ouvrage « Hydrogène renouvelable, l'énergie verte du monde d'après » aux éditions Hippocrate).

Maintenant il faut se préoccuper de la synchronisation entre le développement d'infrastructures et l'accroissement des usages (applications) et peut-être sélectionner des territoires pilotes avant un déploiement national et européen.

Sur la partie mobilité nous avons deux approches qui doivent converger : une par cluster et sur les zones périurbaines avec de l'utilitaire léger qui va utiliser suivant les besoins soit des batteries, soit des piles à combustible ou bien encore des moteurs thermiques à hydrogène. L'autre est une approche nationale par corridor favorisant le quadrillage territorial. Les professionnels du transport estiment que sur le corridor NORD-SUD et le corridor EST-OUEST, il faudrait dispatcher 400 stations pour un maillage correct, dans un premier temps avec de l'hydrogène comprimé. La phase liquide est prévue pour plus tard. Au niveau Européen nous tablons sur 100 000 véhicules lourds en 2030 et 600 000 véhicules légers.

A mesure que le carbone coûtera de plus en plus cher, concrètement, 30 € la tonne en 2020, 50 € en 2030, 150 € en 2040 et de 350 € en 2050, l'hydrogène gris sera pénalisé. Mais attention aux effets induits sur les énergies renouvelables (ENR) fortement consommatrices d'énergie carbonée lors de leur fabrication. Annoncé comme l'électricité produite la moins coûteuse, le photovoltaïque, qui flirte aujourd'hui avec les 20 €/MWh, pourrait subir une perte de compétitivité par rapport à l'éolien offshore, moins carboné à la fabrication. Il faut donc garder en tête cette variabilité des coûts des ENR en fonction de leur empreinte carbone croissante.

Reconnu comme une Gouvernance agissant pour la transition énergétique et de la mutation industrielle, le Comité national hydrogène travaille aussi sur les perspectives importantes d'emplois.

Un référentiel des compétences-métiers sera présenté par France hydrogène fin mars, puis rendu accessible par internet.

Le développement de l'hydrogène va conduire à l'émergence de nouveaux métiers et une nouvelle filière génératrice d'environ 40 000 emplois directs et indirects. Chez les constructeurs la permutation vers l'électricité a démarré. Sur les 75 métiers identifiés, une quinzaine apparaît déjà en tension.

Pour y remédier, de nouvelles initiatives pourraient émerger dans le domaine de la formation professionnelle.

Deux projets ont été évoqués :

- La « Symbio Hydrogen Academy » portée par l'entreprise Symbio qui vise à former 300 personnes par an aux métiers de l'hydrogène dans la région lyonnaise.
- La « H2 Académie », portée par le groupe Air Liquide, est destinée à former des étudiants en BTS à partir de septembre 2021 à Port-Jérôme, près du Havre.

L'Observatoire des piles à combustible et de l'hydrogène est une initiative du « *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* » visant à fournir des informations pertinentes aux parties prenantes intéressées du secteur. Sur le site internet, une carte à l'échelle de l'Europe (voir le QR Code), géolocalise les programmes de formation et les cours sont affichés en fonction de leur emplacement. Il est possible d'explorer les données en sélectionnant le type de formation disponibles dans le secteur. Les catégories se réfèrent à différents niveaux d'éducation : programmes de baccalauréat, de maîtrise, de doctorat et de post-doctorat. Des formations hors programme sont également répertoriées, comme des écoles d'été, des ateliers ou des stages. Un filtre linguistique est disponible pour affiner votre recherche en fonction de vos besoins.

Récemment, Agnès Pannier-Runacher, la ministre de l'Écologie a rendu hommage durant la première réunion du comité national de l'hydrogène, à l'entreprise SAFRA née il y a plus de 65 ans, qui illustre le savoir-faire et le talent de notre tissu industriel, qui innove et qui, malgré les difficultés liées au contexte que nous connaissons actuellement, se transforme pour saisir le virage de la transition écologique, concluant sur « L'hydrogène sera sans doute une des grandes révolutions énergétique et industrielle de notre siècle ». Mme Pompili a de son côté fait le point sur les avancées dans la filière.

La ministre a annoncé vouloir renforcer la part de

subvention accordée aux entreprises dans le cadre de l'appel à projet « Briques technologiques et démonstrateurs », pour la porter à 60 %, voire 75 % de l'aide dans certains cas. Elle a fait ensuite référence à l'ordonnance sur l'hydrogène présentée la semaine dernière en Conseil des ministres. Les modalités de cette aide au fonctionnement à destination de sites industriels consommateurs d'hydrogène ou d'usages mobilités pour un lancement des premiers appels d'offres en 2022 sont en cours de concertation et des premiers échanges ont eu lieu avec la Commission de l'Assemblée Nationale.

Le Coordonnateur de la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France, Monsieur Hoang Bui, était présent également à Albi, pour la première réunion du Conseil National de l'Hydrogène. Rattaché au secrétariat général pour l'investissement (SGPI), un des services du Premier ministre, son rôle est de transcrire toutes les décisions au comité exécutif du Conseil de l'innovation, lui-même constitué des directeurs généraux d'administration concernés. Il supervisera surtout la stratégie en lien en étroite avec les ministères compétents, réunis en task force. Cet Ingénieur des Mines était précédemment chef du bureau « ressources énergétiques du sous-sol » pour les affaires relatives à l'élaboration et à la mise en œuvre de la réglementation technique relative aux activités de recherche et d'exploitation des ressources énergétiques du sous-sol (hydrocarbures liquides ou gazeux, géothermie) à la DGEC (Direction Générale Énergie Climat) au ministère de l'Écologie. Il a travaillé aussi au ministère de l'Économie et à la direction régionale et interdépartementale de l'énergie en Ile de France.

La mission de M. Bui sera d'animer et d'orienter, dans un cadre interministériel, la conception des différentes actions à mettre en œuvre et assurer leur cohérence et leur articulation avec les cadres législatifs et réglementaires ; d'assurer l'atteinte des objectifs des actions en participant au suivi des projets sélectionnés, ainsi qu'à leur évaluation d'impact ; de garantir le respect des objectifs et des principes d'intervention de ces actions, et pour ce qui concerne les actions relevant du PIA (Programme investissements d'avenir), d'en piloter la mise en œuvre et superviser l'activité des opérateurs qui en sont chargés ; de définir les indicateurs permettant de suivre la stratégie et d'en assurer le reporting ; de se concerter régulièrement avec les écosystèmes concernés (entreprises et filière, collectivités, communautés de recherche et de formation, etc.) et de favoriser la communication autour de la stratégie.

POINT DE VUE

L'HYDROGÈNE SUR ORDONNANCE - LE COMITÉ NATIONAL HYDROGÈNE

Cette première réunion du Conseil national de l'hydrogène à Albi a apporté d'autres enseignements : de premiers éléments ont été présentés concernant les projets d'envergure qui pourraient bénéficier d'un accompagnement dans le cadre du PIIEC¹ en cours de construction au niveau européen, sous l'impulsion de la France et de l'Allemagne. Ces projets français représentent un montant total d'aide avoisinant les 8 Mds€ et concernent la production d'électrolyseurs, la décarbonation de l'industrie lourde, la production des équipements pour la mobilité. Les projets retenus donneront lieu aux premiers versements d'aides dès la fin de l'année.

Le dispositif, à l'instar de celui sur les batteries, autorise les États membres à financer les projets au-delà des limites habituellement fixées par la réglementation européenne lorsqu'il s'agit de soutenir des projets de grande ampleur qui apportent une contribution très importante à la croissance économique, à l'emploi et à la compétitivité de l'industrie et de l'économie de l'Union.

Membres du conseil national de l'hydrogène

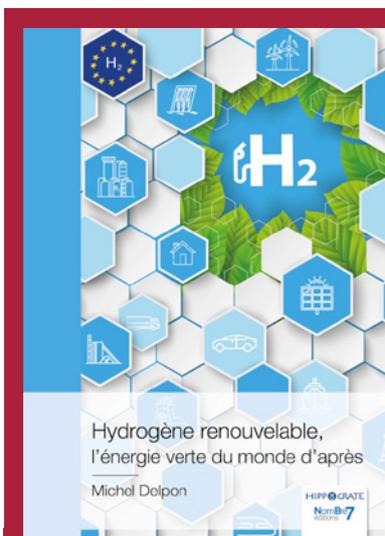
Ce nouveau conseil fonctionnera dans le cadre du Conseil national de l'industrie (CNI) et associera les Régions de France. L'instance sera coprésidée par Patrick Koller, directeur général de Faurecia et représentant du Comité stratégique de filière (CSF) Automobile, et Benoît Potier, président-directeur général d'Air Liquide. Sa composition a été proposée aux ministres par Alexandre Saubot, vice-président du CNI, qui y participe lui aussi.

Outre ces trois membres, le Conseil national de l'hydrogène, comprend Philippe Boucly, président de France Hydrogène, Laurent Carme, directeur général de McPhy, Frédéric Chalmin, directeur général de KemOne (représentant du CSF Chimie et Matériaux), Philippe Darmayan, président d'ArcelorMittal France (représentant du CSF Mines et Métallurgie), Jean-Brice Dumont, directeur exécutif d'Airbus (représentant du CSF Aéronautique), Gabrielle Gauthey, directrice générale du Carbon Neutrality Business de Total, Hervé Guillou, président du CSF Industriels de la mer, François Jacq, administrateur Général du CEA, Jean-Bernard Lévy, président-directeur général d'EDF, Catherine MacGregor, directrice générale d'Engie, Henri Poupert-Lafarge, président-directeur général d'Alstom (représentant du CSF Ferroviaire), Guy Sidos, président-directeur général de Vicat (représentant du CSF Construction) et Pierre Verzat, président de Syntec ingénierie. ■

Scannez
et découvrez !



Pour scanner, téléchargez l'app Unitag
gratuite sur unitag.io/app



HYDROGÈNE RENOUVELABLE, L'ÉNERGIE VERTE DU MONDE D'APRÈS

par Michel Delpon aux éditions Nombre7 (parution mars 2021)

Cet ouvrage est préfacé par Bertrand Piccard, explorateur et Président de la Fondation Solar Impulse.

<http://www.relations-publiques.pro/wp-content/uploads/pros/20210323164316-cp-ghmi.doc>

le lien vers la version web (commande) :

<https://librairie.nombre7.fr/hippocrate/2044-hydrogene-renouvelable-l-energie-verte-du-monde-d-apres-9782381534411.html>

¹ Projet Important d'Intérêt Européen Commun.

VERS L'AVIATION DÉCARBONÉE !

par Stéphane Cueille, Directeur Groupe R&T et Innovation chez Safran



Stéphane Cueille est diplômé de l'École polytechnique (promotion 1991) et titulaire d'un Doctorat en physique statistique (1998). Ingénieur de l'armement, il débute chez Snecma de 1998 à 2001. En 2001 Il rejoint la DGA. En 2008, il revient chez Snecma (Safran). En mai 2013, il est nommé directeur général de la filiale britannique d'Aircelle (Safran) basée à Burnley. En 2015, il est nommé directeur de Safran Tech, le centre de R&T du groupe. En 2016, il devient directeur Groupe R&T et Innovation.

Face au défi que représente le changement climatique, la neutralité carbone de l'aviation est un objectif qui embarque tous les acteurs du secteur, mais également les pouvoirs publics et énergéticiens. Le positionnement de Safran sur une grande part des systèmes de l'avion, et en particulier sur tous les systèmes énergétiques, le place au cœur de la réponse technologique.

Une voie dans laquelle Safran est déjà engagée depuis plusieurs années.

Safran concentre depuis de nombreuses années ses travaux de recherche et développement sur la limitation de l'impact environnemental du transport aérien. Cela passe naturellement par une démarche visant à optimiser l'efficacité énergétique des moteurs, mais aussi de toute la chaîne de l'énergie à bord, ainsi que l'allègement global des équipements de l'avion.

Le renouvellement de la flotte, un premier levier déjà enclenché

Safran, au travers de CFM International, une co-entreprise entre Safran Aircraft Engines et General Electric, a développé le moteur LEAP, équipant aujourd'hui les Airbus A320neo et Boeing 737 Max. Ce moteur, entré en service en 2016, affiche une consommation de carburant de 15% inférieure à celle des moteurs CFM56 qui équipent la génération précédente.

Le renouvellement naturel de la flotte actuellement en service, sur les 20 ans à venir, sera une contribution importante à la réduction des gaz à effet de serre. En effet, sur l'ensemble de la flotte, ce renouvellement progressif apportera un gain annuel de 1 à 2% sur les émissions de CO₂ par passager pendant les quinze prochaines années.

En matière d'amélioration de l'efficacité environnementale et énergétique du transport aérien, il n'y a pas une, mais plusieurs pistes !

Les objectifs annoncés pour 2050 exigent que l'ensemble des industriels et acteurs économiques de la filière s'attèlent à la réduction de l'impact environnemental de l'avion. Safran estime que trois leviers sont importants pour atteindre les objectifs visés : la mise au point d'avions ultra-efficace pour entrée en service à l'horizon 2035, le développement de carburants alternatifs (dont les biocarburants, les carburants de synthèse et l'hydrogène) et enfin l'optimisation des opérations aériennes. L'avion ultra-efficace est un élément majeur de la chaîne, et pour ce qui nous concerne, nous devons préparer des ruptures sur les moteurs et réduire la masse de tous nos équipements.

QUEL TYPE DE MOTORISATION POUR L'AVION DÉCARBONÉ ?

Une nouvelle génération de moteur avec l'introduction de ruptures technologiques offrant des gains d'efficacité énergétique de l'ordre de 20% par rapport à la dernière génération de moteurs.

L'introduction d'avions plus récents et plus efficaces, comme ceux équipés des moteurs LEAP, permettent de réduire de 1% à 2% par an les émissions de CO₂ par passager au km parcouru, ce qui représente déjà un gain de 15% à l'horizon 2035. Pour atteindre l'objectif de 2050 de neutralité carbone des avions en vol, il faut combiner deux axes d'efforts : apporter une nouvelle rupture sur la consommation de carburant et remplacer le kérosène par un carburant « bas ou zéro carbone ».

Développer un avion qui serait en rupture à l'horizon 2035 signifie atteindre l'hyper efficacité énergétique, avec une réduction drastique de la consommation de l'ordre de 30% par rapport à l'Airbus A320 actuel. Une recherche « incrémentale » apporterait 15% de réduction. Atteindre 30% est donc un vrai défi et concrètement, c'est comme sauter une génération d'avion ! Au niveau des moteurs, Safran va viser des architectures innovantes à très fort taux de dilution, qui tireront parti des acquis du démonstrateur de l'Open Rotor, qui est un moteur sans

POINT DE VUE VERS L'AVIATION DÉCARBONÉE !

carénage, et devront apporter au moins 50% du gain de consommation sur l'avion. Nous visons donc plus de 20% de gain de consommation sur le moteur ! De plus ces moteurs devront être capables de fonctionner avec 100% de carburants durables.

En effet nous sommes convaincus qu'il faut viser le remplacement complet à terme du kérosène par de nouveaux carburants.

VERS DES CARBURANTS ALTERNATIFS !

Pour atteindre ces objectifs de réduction des émissions de CO₂, l'aviation devra adopter très largement des carburants alternatifs en remplacement du kérosène.

D'un point de vue technologique, la solution immédiatement accessible réside dans les carburants directement utilisables dans les avions existants en mélange avec du kérosène. Les technologies des moteurs actuellement en service permettent d'ores et déjà d'incorporer jusqu'à 50% de biocarburants issus de biomasse non alimentaire. Néanmoins, l'usage de ces derniers reste actuellement très limité, faute d'une filière industrielle suffisamment développée pour assurer leur disponibilité en quantité suffisante et à un coût compétitif pour les compagnies aériennes. Des réglementations incitatives sont nécessaires pour lever ces freins qui sont économiques et non techniques.

Safran travaille à augmenter encore ce taux d'incorporation en développant des technologies capables de dépasser la limite de certification actuelle de 50%. Il s'agit surtout de résoudre des problèmes de durée de vie des joints et des pompes, principalement liés à la moindre teneur en composés aromatiques de ces carburants, afin de garantir un fonctionnement optimal en combustion.

Enfin, la prochaine génération de moteur ultra-efficace, permettra d'incorporer jusqu'à 100% de ces carburants issus de la biomasse.

Une autre option passe par les carburants de synthèse, carburants issus d'un procédé d'électrosynthèse utilisant une énergie électrique décarbonée, qui prélève du carbone dans l'atmosphère ou dans des fumées industrielles, et qui ouvre ainsi la perspective d'un carburant totalement neutre en émissions. De telles « raffineries », existent déjà à petite échelle, encore très expérimentales. Mais leur potentiel est là : avec suffisamment d'investis-

sements, le Power-to-Liquid pourrait émerger à partir de 2030 comme une filière efficace à grande échelle.

L'hydrogène est actuellement le carburant souvent évoqué pour l'avion zéro émission. Néanmoins, les défis technologiques à relever pour réussir à certifier un avion propulsé avec un tel carburant sont énormes.

L'hydrogène liquide associé à une turbine à gaz est une option de rupture. L'intérêt de l'hydrogène est l'absence d'émissions de CO₂ en vol. En contrepartie, il existe de nombreuses questions techniques à résoudre, notamment au niveau de l'ensemble du système de carburant à bord vis-à-vis de son stockage et de sa distribution et des enjeux de certification. Se posent aussi des questions qui vont au-delà du champ d'action de Safran, à savoir l'horizon de disponibilité d'hydrogène décarboné en quantité suffisante et à un coût acceptable (ce qui est une question également pour le Power-to-Liquid), la chaîne d'approvisionnement en hydrogène liquide dans les aéroports et les technologies d'avitaillement de l'avion au sol. Les projets de recherche lancés sur le sujet visent à statuer sur la faisabilité, les bénéfices par rapport notamment au Power-to-Liquid, et le calendrier de disponibilité des technologies.

Le moteur et l'adaptation aux nouveaux carburants constituent donc la colonne vertébrale de la stratégie. Mais le moteur seul ne suffira pas à atteindre les objectifs de réduction de consommation de l'avion.

L'ensemble des travaux qui sont actuellement menés par le Groupe pour réduire la masse des avions, est un autre levier important vers la réduction des émissions de CO₂.

VERS DES MATÉRIAUX DE PLUS EN PLUS LÉGERS.

Un autre levier pour moins consommer, c'est de peser moins lourd ! Safran travaille ardemment à faire perdre du poids à l'ensemble des composants et équipements de l'avion du futur.

Alléger les avions passera par l'utilisation de matériaux composites qui remplissent les promesses de bonne tenue mécanique et thermique avec un moindre poids. Des gains importants peuvent ainsi être réalisés sur la masse des avions grâce aux matériaux à haute performance sur lesquels travaille Safran, couplés à l'essor de la

fabrication additive - ou impression 3D - qui offre un grand potentiel d'allègement sur les moteurs, jusqu'à 25%, voire même 50% comme sur certains équipements hydrauliques. De même, grâce aux synergies sur les intérieurs d'avions, Safran peut pousser l'intégration de produits basés sur des matériaux plus légers, comme des composites avancés, pour réduire la masse des cabines.

Enfin, Safran est un acteur en pointe dans le domaine de « l'avion plus électrique » et couvre l'ensemble de la chaîne de l'énergie à bord de l'avion, et peut assurer l'intégration des produits en optimisant la masse globale.

C'est la combinaison de ces différents leviers, associés à l'optimisation des opérations aériennes à travers une meilleure gestion du trafic et des trajectoires notamment, qui permettront au transport aérien d'atteindre ses objectifs de division par deux des émissions de CO₂ à l'horizon 2050 sur la base des émissions de 2005. Ce qui signifie qu'en tenant compte de la croissance prévisible du trafic aérien, nous allons rendre la flotte plus efficace de 90%. Et Safran compte bien jouer un rôle majeur dans la contribution à ces objectifs. ■

L'ONERA ET LE PÔLE HYDROGÈNE EN OCCITANIE

par Nicolas Bertier, Ingénieur de recherche, représentant l'ONERA au Pôle universitaire hydrogène en Occitanie

Les plans de relance européens, nationaux et régionaux comportent tous un volet en faveur d'une transition écologique à la fois rapide et durable. Cet engagement volontariste de l'ensemble des acteurs, publics et privés, en faveur de moyens de transport respectueux de l'environnement vise à traiter concomitamment les impacts sur la filière de la double crise sanitaire et climatique.

Depuis sa création en 1946, l'ONERA a dans ses missions d'assurer à la France une indépendance stratégique et un leadership mondial. La stratégie scientifique de l'Office - et c'est sa singularité - est construite en cohérence avec les entreprises du domaine ASD et sa tutelle la DGA. L'ONERA participe à l'espace européen de la recherche, par exemple avec l'EREA qui regroupe 14 organismes européens de recherche aéronautique, est membre du CORAC. Son positionnement est donc résolument national en qualité d'organisme de recherche, international en coopération avec nos partenaires étrangers et - pour autant - en synergie avec les dynamiques territoriales.

En Occitanie, la Région, Toulouse Métropole et les acteurs de la recherche se mobilisent depuis plusieurs mois afin d'élaborer les programmes nécessaires à un développement socio-économique durable et à la préservation des emplois de la filière aéronautique. L'ONERA, qui est membre associé renforcé de l'Université fédérale Toulouse-Midi-Pyrénées, contribue à cet effort aussi bien en termes de recherches propres (de nombreux sujets identifiés dans le plan de relance actuel en faveur de l'économie aéronautique et spatiale figuraient déjà dans nos feuilles de route rendues publiques en 2019 <https://www.onera.fr/fr/feuille-de-route>) mais également en développant des collaborations avec l'ensemble des structures de recherche régionales (proposition de quatre projets dans le cadre des contrats de plan État-Région 2021-2027).

Parmi les grands enjeux actuels figure le développement pour l'aéronautique de technologies basées sur l'utilisation de l'hydrogène. En effet, dans la perspective de la décarbonation du transport aérien, le remplacement du jet-fuel actuel à base de kérosène par de l'hydrogène semble une option particulièrement séduisante (suppression des émissions directes de CO₂, d'hydrocarbures imbrûlés, de suies, d'espèces soufrées,

etc.). Par ailleurs, l'utilisation de piles à combustible pour fournir l'énergie « non propulsive » à la place des APU (*Auxiliary Power Unit*) pourrait également contribuer à réduire l'empreinte environnementale du transport aérien. Sur cette « thématique H2 », particulièrement porteuse depuis qu'Airbus a annoncé vouloir commercialiser un avion « zéro émissions » pour 2035, l'Occitanie a fait le choix de structurer les actions régionales de recherche autour du « Pôle Universitaire Occitan de l'H2 » impliquant, entre autres, l'Université fédérale Toulouse-Midi-Pyrénées, l'Université Paul Sabatier, le CNRS, l'INPT, l'INSA Toulouse, l'ENAC, l'Université de Montpellier, l'ISAE-SUPAERO et bien sûr l'ONERA. Il faut également noter que l'ONERA apportera son expertise dans le cadre du projet de « technocampus de l'hydrogène » sur le site de Franczal (historiquement le premier aéroport public toulousain, géographiquement proche à la fois des centres ONERA de Toulouse et du Fauga-Mauzac), porté par Toulouse Métropole et la Région Occitanie.

L'ONERA dispose - de longue date - d'une expertise sur l'hydrogène, en particulier pour son utilisation dans les chambres de combustion développées dans le cadre des programmes Ariane (moteurs Vulcain puis Vinci) mais également pour les études de lanceurs aérobie dans les années 90 (propulsion par statoréacteur). Par ailleurs, concernant la propulsion aéronautique, l'étude du rôle que pourrait y jouer l'hydrogène apparaît en bonne place dans le plan scientifique stratégique 2015-2025 de l'Office, construit en concertation avec les industriels et les partenaires publics - notamment dans le cadre du CORAC et du GIFAS - pour « éclairer le futur ». Pour disposer en 2035 d'un « avion vert », la stratégie de recherche et de développement technologique sera nécessairement multidisciplinaire. C'est également une force de l'Office de pouvoir apporter des compétences dans des domaines aussi variés, par exemple, que la combustion, les matériaux, la simulation multi-physique et l'optimisation, la compatibilité électromagnétique ou l'étude de l'impact environnemental.

C'est dans ce contexte que, lorsque l'ONERA a reçu en janvier 2021 le courrier de la Présidente de Région appelant à la mobilisation des établissements et organismes de recherche en faveur du « *Green New Deal* », il a été décidé de nommer un représentant pour l'ONERA au Conseil du

« pôle universitaire occitan de l'hydrogène » porté par l'Université fédérale Toulouse-Midi-Pyrénées. De fait, ce sera un binôme constitué de Nicolas Bertier et d'Olivier Rouzaud qui assurera cet interfaçage avec les chercheurs des différents établissements mobilisés.

Ils apporteront une expertise, une vision sur les moyens et les savoir-faire tant régionaux que nationaux mobilisables par l'Office et un éclairage international particulièrement utile sur un sujet où la compétition est mondialisée.



Laboratoire de combustion multiphasique sur le centre ONERA du Fauga-Mauzac

Nicolas Bertier est nommé représentant ONERA au Conseil du Pôle universitaire occitan de l'hydrogène. Olivier Rouzaud participera également à cette représentation scientifique des intérêts de l'Office afin d'apporter une expertise sur le volet expérimental, sur des composantes techniques ou en matière d'interfaces locales avec l'écosystème.

Le programme Défis Clef Hydrogène Vert est un programme d'animation stratégique doté par la Région Occitanie d'un budget de 3M€ et de 4M€ de fonds européens pour 4 ans, son périmètre thématique couvre :

- Production d'hydrogène dont l'électrolyse, la thermoconversion, la photocatalyse,...
- Stockage de l'hydrogène à l'état solide, liquide, compressé, etc.

- Utilisation directe de l'hydrogène pour la production d'énergie par piles à combustible, combustion de l'hydrogène
- Maîtrise de la sécurité des technologies de l'hydrogène dont les capteurs, la modélisation de la détonique, etc.
- Hydrogène et société dont l'acceptabilité sociétale des technologies hydrogène

Le périmètre d'activité couvre les TRL 1 à 6 dans une acceptation large du bilan environnemental des utilisations de l'hydrogène y compris réduction des CO₂/NO_x et ultra-sobriété.

Le rôle du représentant ONERA est de participer aux réunions du Conseil du Pôle universitaire occitan de l'hydrogène et à développer des liens avec les membres du Bureau de direction. Il lui appartient également d'assurer le lien avec les équipes ONERA concernées au local et au national. ■

L'HYDROGÈNE POUR L'AVIATION, DE GRANDS DÉFIS : COMBUSTION, INJECTEUR, ET MISE EN ŒUVRE

par Paul Palies¹, chercheur et professeur associé à l'Université du Tennessee Space Institute adjacente au Arnold Engineering Development Complex de l'US Air Force.



Paul Palies est diplômé de l'Université Paris XI (licence et maîtrise mécanique) et de l'École centrale Paris (master énergie et aéronautique puis doctorat en combustion). Il a une expérience aux États-Unis de plus de dix ans portant notamment, pour Pratt and Whitney, sur les instabilités de combustion, leur modélisation et contrôle. Il a été principal investigator pour l'AFRL et la NASA sur la modélisation numérique LES et le développement d'un concept d'injecteur disruptif. Il est membre nommé de l'*United States National Committee on Theoretical and Applied Mechanics* et du comité technique combustion de l'*American Institute of Aeronautics and Astronautics*.

AVANT-PROPOS

Il existe en France, depuis peu, une direction politique particulièrement claire pour la réduction des émissions de CO₂. En effet, la COP21, puis le plan hydrogène en 2018, le plan de relance de 2021 ainsi que les positions européennes successives sont des étapes qui ont permis de redéfinir et d'adapter la politique énergie et transport. Dans ce contexte, l'objectif central est la réduction des émissions de CO₂ étant donné le consensus sur le rôle de ce gaz en terme de changement climatique.

UN POINT SUR LE CLIMAT

Les gaz à effet de serre (GES) comprennent le CO₂, le CH₄ (méthane), la vapeur d'eau (H₂O) et les oxydes d'azote (NO_x). Les émissions de CO₂ restent dans l'atmosphère pendant près de 100 ans tandis que les autres ont des durées de vie plus courtes ; il est donc admis que le principal effet du réchauffement climatique est dû au CO₂. Dans une chambre de combustion de moteur d'avion, le kérosène et l'air réagissent chimiquement pour former en premier lieu les produits gazeux de combustion : le dioxyde de carbone CO₂ et la vapeur d'eau H₂O. Ces deux gaz sont des GES et il faut préciser leurs rôles respectifs dans le réchauffement climatique. Le H₂O constitue naturellement l'atmosphère sous forme de vapeur. S'il a un fort effet de serre, il est admis qu'il n'est pas le responsable du réchauffement climatique, mais plutôt un amplificateur en présence de CO₂. Les raisons de ces rôles distincts sont associées au rôle de la vapeur d'eau dans le cycle de l'eau, car la vapeur d'eau ne peut pas s'accumuler

dans l'atmosphère au-delà d'un certain seuil. En effet, le cycle de l'eau de l'atmosphère est tel que les eaux liquides de l'océan s'évaporent et s'élèvent sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère jusqu'à des altitudes où elles se transforment en liquide et forment la pluie. Ce cycle est imposé par les températures globales. Lorsque le CO₂ induit un effet de réchauffement climatique, la quantité de vapeur d'eau est plus élevée, amplifiant ainsi la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Avec l'hydrogène comme carburant, les espèces chimiques H₂O et NO_x seront toujours à considérer, mais dans une moindre mesure que le CO₂ en raison de leurs courts temps de séjour dans l'atmosphère par rapport au CO₂ et l'intégration de la vapeur d'eau dans le cycle naturel de l'eau si la molécule H₂ provient de l'électrolyse.

LE RÔLE DE L'HYDROGÈNE DANS L'AVIATION

Les émissions de CO₂ sont largement émises par la combustion des carburants fossiles : kérosène ou biocarburants. Il existe deux candidats majeurs dans les secteurs de l'énergie et du transport pour supprimer ou réduire l'empreinte de ces carburants : le moteur électrique ou thermique. Pour des raisons historiques et de souveraineté, la France s'appuie sur le nucléaire pour son énergie et celle-ci a permis le développement et des progrès considérables dans les domaines de l'atome et a fait éclore des projets ambitieux à très long terme comme ITER. Il reste cependant dans ces projets la question du traitement des déchets nucléaires. Dans le domaine du transport et plus particulièrement de l'aéronautique, le développement des connaissances technologiques et

¹ ppalies@utk.edu

L'HYDROGÈNE POUR L'AVIATION, DE GRANDS DÉFIS :
COMBUSTION, INJECTEUR, ET MISE EN ŒUVRE

scientifiques a permis, là aussi, de bâtir des entreprises nationales clés tels que Safran Aircraft Engine ou Airbus. Très peu de pays ont tous ces atouts techniques et scientifiques acquis et construit sur le long terme.

Bien que les émissions de CO₂ dues au transport aérien ne représentent que 2% du total mondial émis, il s'agit de contribuer dans ce secteur aussi à l'effort global et en même temps d'utiliser les connaissances acquises pour d'autres secteur ou usages. Ainsi, l'hydrogène est à la fois envisageable pour le domaine électrique (piles à combustible) ou thermique (combustion), deux technologies qui ont récemment reçu plus d'attention et qui ont été validées par exemple pour le transport routier. Il reste cependant un réseau d'approvisionnement à déployer pour mettre en œuvre ce choix stratégique et il ne pourrait s'arrêter à nos frontières. Du côté du transport aérien, l'hydrogène basé sur la pile à combustible ne permet pas d'être envisagé au-delà de petits avions personnels privés du fait de la puissance requise. Seule la solution thermique permettrait d'avoir des avions de capacités telles que l'on connaît aujourd'hui et satisfaisant la réduction des émissions.

OBJET DE L'ARTICLE :

Dans cet article, sont présentés les recherches estimées nécessaires ainsi que les moyens requis pour le développement d'injecteurs et de chambres de combustion qui satisferaient la réduction des émissions polluantes et permettraient leur utilisation pour l'hydrogène. Sont envisagés aussi les moyens nécessaires à un tel déploiement avec une vision plus large au-delà de mon expertise technique.

INJECTEUR ET COMBUSTION

Une question importante devant être considérée pour faire évoluer les systèmes aéronautiques propulsifs commerciaux vers un fonctionnement avec addition partielle ou totale d'hydrogène est celle de la conception des injecteurs et de la compréhension des processus de combustion associés tels que la stabilisation et la dynamique de flamme. La figure 1 illustre certains des mécanismes qui peuvent exister dans une chambre de combustion. La stabilisation de flamme consiste en la capacité d'un injecteur et d'une chambre de combustion à conserver la zone de flamme à une position fixée et

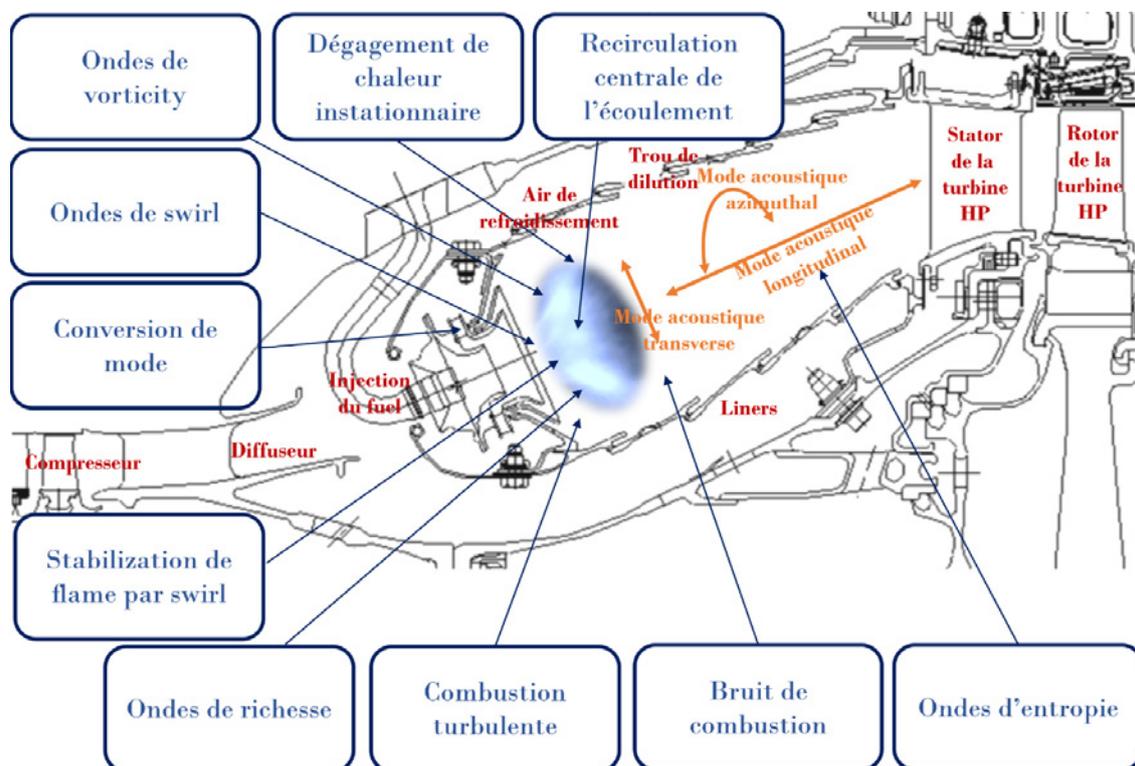


Figure 1. Schéma illustratif d'une chambre de combustion SAE-GE CFM 56 avec mise en avant de certains des mécanismes en jeu pour la stabilisation et la dynamique de flamme.

à éviter le retour ou soufflage de flamme pour toute l'enveloppe de fonctionnement de l'avion. La dynamique de flamme permet ultimement de comprendre comment éviter le couplage de celle-ci avec l'acoustique de la chambre de combustion pour éviter les instabilités de combustion. Les injecteurs aéronautiques ont un rôle clé dans les processus de combustion qui transforment les gaz frais amont en gaz brûlés. En effet, ils déterminent d'abord le mode de combustion (prémélangé, pré-vaporisé, stratifié, liquide, etc.), puis ils jouent un rôle majeur sur l'écoulement global et la physique du fluide locale. Par conséquent, leurs optimisations ainsi que celle de la chambre de combustion sont critiques pour minimiser (1) la consommation de carburant, et (2) les émissions polluantes. Ces optimisations primordiales sont encore difficiles et coûteuses et nécessitent des efforts de recherche importants pour la compréhension des mécanismes sous-jacents avec des outils de modélisations et des moyens expérimentaux de pointe.

Ces moyens permettront de plus l'étude et la caractérisation de la relation entre la forme de la flamme, les propriétés de l'écoulement, la position du front de flamme et la production des polluants (leur zone de production) à partir de la combustion d'hydrocarbures-air sans, puis avec ajout d'hydrogène en utilisant des diagnostics expérimentaux à résolution élevée. Ce sont des aspects importants des recherches à mener pour étudier la formation de polluants tels que les NO_x (même en opérant à 100% H_2) et réduire la consommation du carburant pendant la combustion. Il faut en effet noter que bien que réduisant les émissions de CO_2 , la combustion d'hydrogène avec de l'air induit la formation de NO_x . Cet aspect requiert donc des études sur les mécanismes physiques sous-jacents afin d'optimiser et donc réduire la formation de ces NO_x dans des configurations prémélangées en particulier. Un second volet consisterait à mener les simulations numériques d'accompagnement pour générer des données tridimensionnelles instationnaires des phénomènes physico-chimiques permettant de décrire les conditions favorables ou défavorables de production d'oxydes d'azote, apportant ainsi des connaissances expérimentales et de modélisation combinées uniques sur cet important enjeu. Et ceci particulièrement pour les flammes swirlées telles qu'utilisées dans les chambres de combustion de moteurs aéronautiques futurs. Une flamme swirlée typique modélisée numériquement à très forte résolution est présentée sur la figure 2.

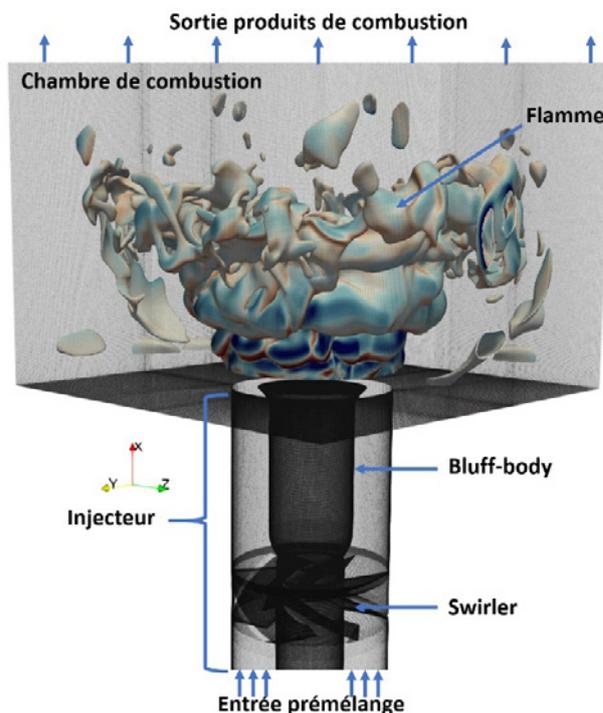


Figure 2. Simulation numérique haute résolution d'une flamme swirlée prémélangée. Maillage structuré de 236 millions de cellules. Image de Palies et Acharya, *Combustion and Flame* 2021.

Ces aspects permettraient de concevoir des injecteurs optimisés réduisant la formation des NO_x et réduisant la consommation de fuel. Un injecteur dont la conception initiale a été réalisée récemment et permettant de fonctionner à prémélange complet est représenté sur la figure 3. Le fonctionnement avec ajout partiel ou total d'hydrogène sur les processus de combustion en termes de stabilisation et de dynamique de flamme swirlée bénéficie d'une littérature limitée avec quelques articles pionniers sur ces sujets à l'échelle du laboratoire mais les analyses détaillées ne sont pas encore assez nombreuses et les outils employés n'utilisent pas nécessairement l'ensemble des possibilités maintenant disponible. Les recherches sont donc toujours importantes dans ce domaine. Les études nécessaires incluent de plus les techniques de contrôle passives pour éviter les phénomènes tels que le retour ou soufflage de flamme, ainsi que les instabilités de combustion. Il est important de préciser qu'il existe plusieurs solutions pour le contrôle de chacun de ces phénomènes : condition thermique des parois/injecteur, position du swirlier, asymétrie des injecteurs sur l'azimut, utilisation de quarl (entourage du brûleur).

L'HYDROGÈNE POUR L'AVIATION, DE GRANDS DÉFIS :
COMBUSTION, INJECTEUR, ET MISE EN ŒUVRE

Il existe enfin des outils de prévision et de modélisation de certains de ces phénomènes comme la dynamique de flammes qui peuvent être mise en œuvre en amont. En ce qui concerne les études sur des chambres de combustion type secteur ou chambre annulaire, elles existent mais sont encore rares pour l'hydrogène. Il n'y a pas de démonstrateur à ce jour fonctionnant à l'hydrogène pour lesquelles les conditions d'opération réelles d'un avion sont réalisées. Bien que la question de la conception de l'injecteur et de la combustion soit centrale, il y a par ailleurs de nombreuses autres questions qui doivent être abordées dans la mise en œuvre de l'hydrogène pour l'aéronautique.

MOYENS ET MISE EN ŒUVRE

En terme de conception de moteur aéronautique fonctionnant à l'hydrogène, il y a tout d'abord quelques questions clés du côté de l'injecteur et donc de la combustion à se poser. La première question est : doit-on faire fonctionner les moteurs exclusivement avec hydrogène ou bien avec ajout d'hydrogène à un autre carburant (kérosène, gaz naturel, biocarburant) et donc où se fait le mélange et l'injection de chacun des carburants ? Cette question est critique sur les choix technologiques au niveau de l'injecteur, son dévelop-

pement et sa démonstration. Un choix très amont est nécessaire. En complément de ce choix, il y a la question suivante : partons-nous d'une architecture existante (injecteur/chambre de combustion) basée sur injection liquide/RQL (Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn) et nous l'adaptions ou bien proposons-nous une autre architecture type à prémélange complet ? En effet, la combustion prémélangée offre l'avantage de réduire, outre le CO_2 par l'utilisation d'hydrogène, les NO_x de part certaines optimisations discutées dans la section précédente. Par ailleurs, en régime de prémélange, le fonctionnement est en dessous de la stœchiométrie et la température des gaz brûlés est réduite comparée à une injection liquide qui donne une combustion type flamme de diffusion.

Quelle que soit la configuration retenue, il y a une série d'étapes nécessaires pour arriver à l'objectif de faire fonctionner un démonstrateur basé sur la combustion hydrogène en banc d'essai, voire un avion complet. Celles-ci doivent s'articuler autour des différentes organisations nationales et internationales incluant les centres de recherche publics et privés. Cela inclut le CNRS, l'ONERA, la NASA, le DLR, Airbus, Safran, et bien d'autres dont le même objectif serait la conception et la démonstration de cette technologie moteur voire la démonstration système en vol. Pour soutenir et mettre en

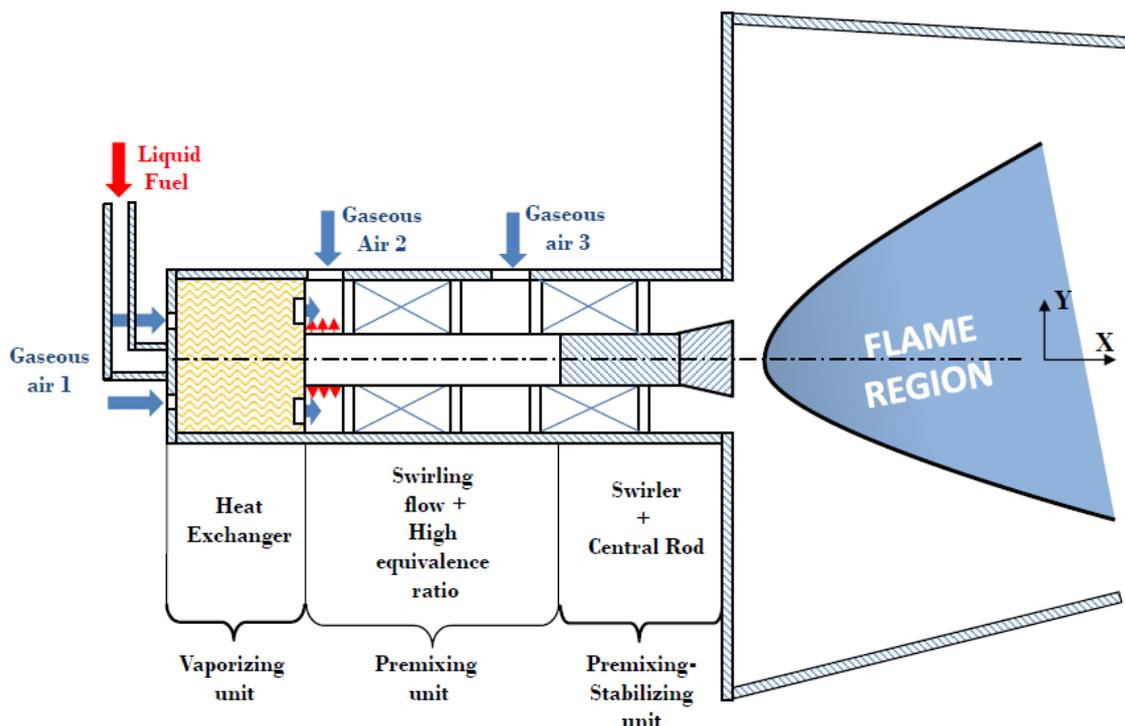


Figure 3. L'injecteur LFP (Lean Fully Premixed) est le seul concept existant pour générer une combustion à prémélange complet pour moteur aéronautique.

œuvre un tel projet, il sera nécessaire de créer un comité ou un institut multinational supervisant et dirigeant la mise en œuvre de chacune des étapes et leur validation en s'appuyant sur les outils, laboratoires et moyens expérimentaux qui existent et qui devront être adaptés. La voie s'appuyant sur la création d'un institut dédié, avec de nouveaux moyens expérimentaux tels que cela est fait pour ITER, pourrait apparaître comme une solution conciliant les impératifs de coordinations multinationales et les exigences techniques et de sécurité requises en amont d'un déploiement des infrastructures qui seront nécessaires pour mettre en œuvre la combustion de l'hydrogène. Un tel institut permettrait de concevoir, opérer et démontrer le fonctionnement d'un moteur turbofan à hydrogène, puis d'un avion équipé d'un tel moteur, mais aussi d'établir l'ensemble des actions futures requises pour leur déploiement. Les impératifs de sécurité doivent être présents durant toutes ces étapes en assurant que chaleur, air et fuel ne soient jamais ensemble par conception.

Les grandes étapes pour la combustion et le design injecteur/chambre de combustion puis la construction et le test d'un démonstrateur à l'horizon 2035 (2050 pour

l'avion complet) pourrait s'architecturer autour de cinq phases successives de trois ans : (1) équipes, moyens expérimentaux et de modélisation, coordination, choix technologiques amont, (2) enveloppe de vol, performance et conception injection système, (3) stabilisation de flamme, (4) dynamique de flamme et contrôle, (5) synergie, choix critiques, conception, fabrication et test démonstrateur. Il y a aussi comme partie intégrante de ce projet central des enjeux majeurs et pistes de recherche à explorer : amélioration des modèles, expériences de laboratoire, et augmentation des capacités de calcul haute performance.

CONCLUSION

De la combustion de l'hydrogène à l'avion à hydrogène, il y a une longue série d'étapes nécessaires qui doivent être supportées et financées de manière coordonnée par un institut international dédié pour garantir et unifier tous les acteurs nécessaires à ce progrès. Il y a déjà de nombreuses technologies basées sur l'hydrogène dans le transport et l'énergie ; l'aéronautique peut demain envisager de remplacer le kérosène par l'hydrogène en incluant une large coordination. ■

CARBURANTS ALTERNATIFS ET ÉNERGIES PRIMAIRES

par Philippe Novelli, directeur propulsion aéronautique et environnement, ONERA

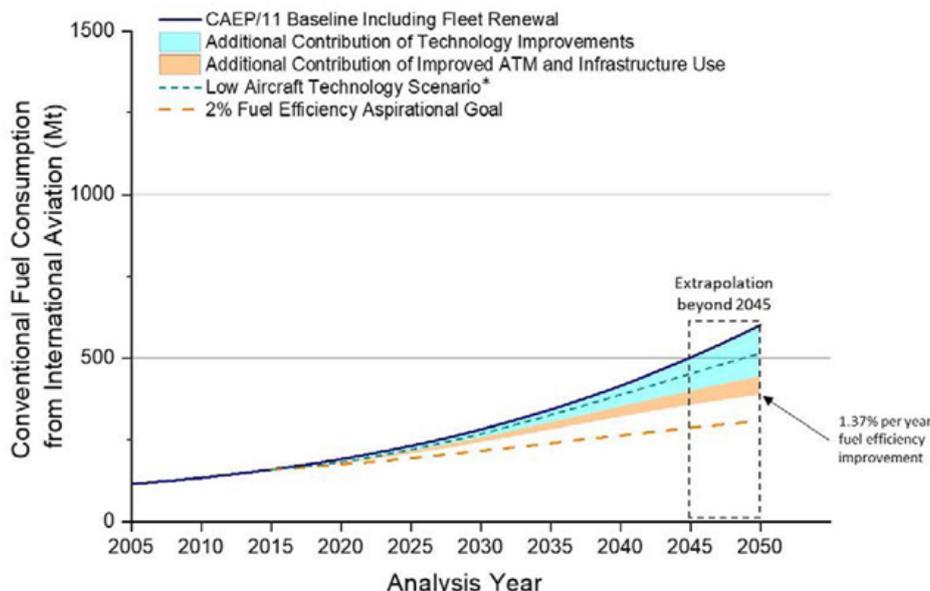


Diplômé des Arts et Métiers et de SUPAERO, Philippe Novelli a rejoint l'ONERA en 1990 et conduit différentes activités de recherche et de coordination dans le domaine de la propulsion aéronautique et spatial. Il a notamment piloté le projet SWAFEA, l'un des premiers projets européens sur les carburants alternatifs pour l'aviation, puis été détaché pendant trois ans à l'OACI en tant que responsable des carburants alternatifs. Il est aujourd'hui Directeur de programme pour la propulsion aéronautique et environnement à l'ONERA.

Avant la crise de la COVID 19, le transport aérien connaissait depuis plusieurs décennies une croissance soutenue que l'ensemble des prévisions voyaient se poursuivre pour les années à venir, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) anticipant un triplement du trafic international à l'horizon 2045 par rapport à l'année 2015¹. Même si la crise actuelle bouscule ces projections et si plusieurs années pourraient être nécessaires pour retrouver les niveaux de trafic de 2019, il reste probable qu'à terme la demande retrouve le chemin de la croissance.

Le transport aérien dépend aujourd'hui presque exclusivement de l'utilisation d'un carburant liquide

d'origine fossile, le kérosène. Toute croissance du trafic non compensée par des gains d'efficacité énergétique s'accompagne d'une augmentation de la consommation globale et des émissions de CO₂, et par conséquent de la contribution à l'effet de serre et au changement climatique. C'est une des raisons pour lesquelles le secteur aérien est engagé depuis de nombreuses années déjà dans un effort d'amélioration de son efficacité énergétique. Depuis l'apparition des avions civils à réaction, la consommation et les émissions de CO₂ par passager-kilomètre ont baissé de près de 80%² et la dernière génération d'avions affiche jusqu'à 25% de gain d'efficacité par rapport à la précédente. Que ce soit au travers de l'ATAG (Air Transport Action Group³),



*Dashed line in technology contribution silver represents the "Low Aircraft Technology Scenario."
Note: Results were modelled for 2005, 2006, 2015, 2025, 2035, and 2045 then extrapolated to 2050.

Figure 1. Projection de la demande de carburant (source OACI)

1. Rapport annuel de l'OACI 2018, WPO54 40ème session de l'assemblée annuelle OACI
2. Source ATAG
3. Association représentant l'ensemble du secteur du transport aérien (constructeurs, compagnies aériennes, etc.)

AÉRONAUTIQUE

CARBURANTS ALTERNATIFS ET ÉNERGIES PRIMAIRES

de l'ACARE (*Advisory Council for Aeronautic Research in Europe*) ou de l'OACI, des objectifs ambitieux de réduction des émissions de CO₂ sont également fixés pour l'avenir ⁴. Néanmoins, les gains d'efficacité aujourd'hui espérés par l'amélioration des technologies actuelles ne permettront pas de juguler l'augmentation de la consommation de carburéacteur découlant d'une croissance de la demande telle que celle anticipée avant la COVID19 (voir Figure 1), alors même qu'il faudrait s'inscrire dans une trajectoire de réduction des émissions pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris.

Par ailleurs, du fait de sa forte visibilité et d'une image souvent associée au transport de personnes privilégiées, l'aviation fait aujourd'hui face à des critiques fortes. Un questionnement émerge quant à son acceptabilité sociétale, dont le *flygskam*, ou « honte de voler » venue de Suède, est l'illustration.

Face à l'urgence climatique, l'aviation doit, comme les autres secteurs économiques, rechercher des sources d'énergie nouvelles et neutres en carbone ⁵.

Confrontée à un défi similaire, l'automobile semble aujourd'hui se tourner résolument vers l'électrification des véhicules avec un stockage d'énergie sous forme électrique dans des batteries. Appliquée aux avions, un paramètre particulièrement important de cette solution technologique est la densité d'énergie stockable par unité de masse d'une batterie. L'état de l'art actuel est de l'ordre de 250 Wh/kg, une valeur à rapprocher de la densité énergétique du kérosène qui est de 12 kWh/kg, soit en équivalent électrique (c'est-à-dire en tenant

compte du rendement supérieur d'une chaîne électrique) une densité de l'ordre de 4500 Wh/kg. On mesure les progrès à réaliser sur les batteries pour atteindre l'A320 tout électrique, sachant qu'il n'y a pas aujourd'hui de voies clairement identifiées pour dépasser des densités énergétiques de l'ordre de 600 Wh/kg ⁶.

L'aviation restera donc tributaire pour longtemps encore d'un combustible embarqué. La seule voie possible pour réduire, voire annuler les émissions de l'aviation, est par conséquent de tendre vers la neutralité carbone des combustibles utilisés, et ce sur l'ensemble de leur cycle de vie. Deux voies principales se dégagent pour cela.

La première est de poursuivre l'utilisation d'hydrocarbures de composition et de propriétés proches du carburéacteur actuel, en substituant à ce dernier des « carburants de synthèse durables » (CSD). Les candidats envisageables sont principalement les biocarburants fabriqués à partir de ressources végétales, de résidus ou de déchets, et les « électrocarburants », carburants de synthèse fabriqués à partir d'eau, de CO₂ et d'électricité décarbonée (en anglais *Power-to-Liquid*, PtL, ou « *power fuels* »). Différentes voies de fabrication de CSD ont d'ores et déjà été approuvées pour l'aviation (huiles hydro-traitées HEFA ⁷, carburant de synthèse Fischer-Tropsch, etc.). Aujourd'hui, ces carburants ne sont pas utilisables purs dans les avions et infrastructures actuels (leur taux d'incorporation maximal autorisé est de 50%) mais ils pourraient le devenir moyennant des adaptations des aéronefs et de la logistique associée, ou par des évolutions de leur composition.

Tableau 1. Vecteurs d'énergie, filières de fabrication et ressources primaires
(ATL : « Alcohol to jet » - SIP : Synthesized iso-paraffins)

Vecteur énergétique	Filière	Procédé	Source primaire		
H ₂	Reformage gaz naturel	Séquestration du carbone	Gaz naturel avec captation et séquestration du carbone		
	Hydrolyse	AEC, PEM, SOEC	H ₂ O	Electricité renouvelable ou nucléaire	
	Bio-H ₂	Reformage biogaz	Fermentation	Biomasse	
Fermentation					
Gazéification					
CH ₄	Biogaz	Fermentation	Biomasse		
	« e-gas »	Méthanation	H ₂ O	CO ₂	Electricité renouvelable ou nucléaire
Hydrocarbure de synthèse	Biocarburant	Fischer-Tropsch	Biomasse		

4. Pour ATAG, un objectif de réduction de 50% des émissions de l'aviation entre 2005 et 2050 ; pour l'ACARE, 75% de réduction par passager-kilomètre pour un avion entrant en service en 2050, et pour l'OACI, croissance neutre en carbone à partir de 2020.

5. On entend par neutralité carbone le fait de ne pas augmenter la quantité de carbone contenu dans l'atmosphère terrestre.

6. Voir A. Misra, EHA Cologne 2018.

7. Hydrogenated Fatty Esters and Acids

La seconde voie consiste à introduire des combustibles radicalement nouveaux en aviation, même s'ils nécessiteront une refonte complète de la conception des avions et des infrastructures de ravitaillement. Le candidat principalement envisagé aujourd'hui est l'hydrogène, dont la production décarbonée est d'ores et déjà mature à l'échelle industrielle grâce à l'électrolyse de l'eau, même si cette production reste limitée (environ 4% de la production globale actuelle d'hydrogène). Excepté peut-être sur des avions d'affaire, l'hydrogène devra être stocké sous forme d'un liquide cryotechnique, à une température de 20 K, en raison de sa faible densité à l'état gazeux, y compris à pression élevée (700 bar). Cependant, même liquéfié, l'hydrogène occupe un volume quatre fois supérieur à celui du kérosène pour un contenu énergétique équivalent. La conception des appareils devra donc être complètement revisitée.

Si l'émergence de l'hydrogène dans l'aviation dépendra en grande partie de critères de faisabilité technologique des avions, l'adoption des CSD ou de l'hydrogène soulèvent également des questionnements forts sur leur approvisionnement : qu'en est-il de la faisabilité de leur production industrielle à grande échelle, de la disponibilité des ressources nécessaires, du coût économique et des performances environnementales réelles ?

S'agissant de combustible de synthèse ⁸, il convient de distinguer le vecteur d'énergie (le combustible proprement dit), sa filière de fabrication et les ressources primaires qu'elle utilise (source primaire d'énergie et/ou matières premières). Les principales filières envisageables pour des CSD et de l'hydrogène neutres en carbone sont illustrées dans le Tableau 1.

Le tableau 1 met évidence qu'il existe essentiellement deux sources primaires pour la production de tous les combustibles alternatifs : la biomasse et l'électricité (combinée à l'eau et éventuellement au CO₂) soit d'origine renouvelable, soit d'origine nucléaire si l'on considère les sources d'électricité décarbonées. La production des vecteurs d'énergie dépend donc directement de la disponibilité de la biomasse ou de l'électricité décarbonée, au travers du rendement énergétique de chacune des filières. De même, les performances environnementales, et en particulier les émissions de CO₂, dépendront de chacune des étapes de production et d'utilisation sur l'ensemble du cycle de vie.

La biomasse est elle-même une voie naturelle de transformation de l'énergie solaire et du CO₂ atmosphérique pour produire de la matière organique que l'on sait ensuite transformer en hydrocarbures par divers procédés chimiques. Le rendement de la photosynthèse est faible, de l'ordre de 2 à 3%, mais les surfaces recouvertes par la biomasse sont très importantes, avec cependant d'importantes compétitions d'usage et des limitations techniques et économiques pour leur exploitation. Au final, l'exploitation de la biomasse pour la production d'énergie en substitution des énergies fossiles pose deux grandes questions liées entre elles :

- la question de la disponibilité de la biomasse à l'échelle locale et mondiale et des compétitions d'usage;
- celle de la durabilité effective de son exploitation et des critères et réglementations permettant d'évaluer et d'encadrer cette durabilité à l'échelle locale et mondiale.

La durabilité ne peut se définir de manière univoque et les approches pour la définir sont multiples. S'agissant de lutter contre le changement climatique, sa composante la plus évidente est le bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie. La durabilité englobe cependant bien d'autres aspects environnementaux, sociétaux et économiques. Ces différents aspects font débat quant aux biocarburants et peuvent dépendre fortement des filières et des biomasses utilisées, en particulier pour les émissions de GES. Si des précautions sont prises, en particulier du point de vue du contrôle des changements d'usage des sols, et si des biomasses performantes sont utilisées, les biocarburants peuvent conduire à des réductions significatives des émissions de GES.

Concernant la disponibilité de la biomasse, son évaluation est intrinsèquement incertaine et les différentes études publiées montrent de fortes variations. Selon le GIEC (2014), le potentiel de production de biomasse, avec un niveau élevé de confiance, s'élèverait à 170 EJ/an ⁹ (énergie primaire de la biomasse). La réalisation effective de ce potentiel suppose néanmoins un effort important de développement de la production et des conditions économiques suffisamment attractives. La part dont pourrait bénéficier l'aviation dépend fortement des politiques énergétiques et de l'allocation des ressources par type d'usage. Par ailleurs, la quantité de biocarburants aéronautiques qu'il est possible de

8. C'est-à-dire non directement extractible d'une ressource naturelle comme le kérosène du pétrole.

9. EJ ou exajoule = 10¹⁸ joules

produire à partir de ce potentiel dépend des types de biomasse et des procédés de conversion. Si 10% de ce potentiel pouvait être orienté vers l'aviation, avec un taux de conversion approximatif de 45%¹⁰, environ 7,6 EJ de biocarburants aéronautiques pourraient être produits. Ce chiffre est à rapprocher de la consommation de kérosène de l'aviation commerciale qui s'élevait à 286 Mt en 2018¹¹, soit 12,7 EJ et 11,2% de la consommation de carburants de l'ensemble des transports.

L'électricité décarbonée peut provenir de sources naturelles renouvelables comme l'énergie solaire ou éolienne, a priori inépuisables à l'échelle de temps de l'espèce humaine, ainsi que de l'énergie nucléaire. De nombreux secteurs sont aujourd'hui susceptibles de se tourner vers une électrification accrue. Combinée à la croissance mondiale et au développement des économies émergentes, cette transition se traduit par une croissance de la demande globale d'électricité. Du point de vue des émissions de GES, l'électrification n'a de sens que si elle s'accompagne d'un gain d'efficacité énergétique (sur la chaîne complète allant de la production d'électricité à sa conversion en énergie mécanique ou thermique) ou d'une décarbonation parallèle de l'électricité, décarbonation souhaitable dans tous les cas pour atteindre les objectifs climatiques. La demande d'électricité décarbonée est donc appelée à croître fortement, indépendamment des besoins de l'aviation. Pour cette dernière, si l'électricité est utilisée pour la fabrication de combustible, il n'y aura pas de gain d'efficacité énergétique et il sera indispensable de s'assurer que de l'électricité décarbonée est utilisée, et donc produite de manière additionnelle à la consommation des autres secteurs. Ainsi, on estime qu'un électrocarburant fabriqué avec le mix énergétique européen actuel émettrait trois fois plus que le kérosène¹². À l'inverse, avec une électricité entièrement décarbonée, les émissions associées à la production de l'hydrogène ou des électrocarburants sont presque nulles¹³. L'enjeu est donc de savoir quelles sont les perspectives de développement de la production d'électricité décarbonée à l'échelle mondiale et d'évaluer l'impact d'une demande additionnelle de l'aviation sur les scénarios actuellement

envisagés, en termes de capacité à créer et à financer les infrastructures nécessaires, et en dernier ressort en termes de disponibilités des ressources.

Sur la base des rendements actuels de la production d'hydrogène liquéfié par électrolyse de l'eau (environ 50%), produire l'équivalent énergétique de la consommation de kérosène de 2018, nécessiterait une production annuelle d'électricité décarbonée d'environ 25 EJ¹⁴. À titre de comparaison, la production annuelle d'électricité décarbonée a augmenté de près de 14,6 EJ entre 2000 et 2018 et l'IEA projetait en 2018 une croissance de l'ordre de 41 EJ d'ici 2040 dans son scénario « *New Policies* »¹⁵ prenant en compte les ambitions annoncées par les États dans le cadre de l'accord de Paris. Introduire une part d'hydrogène dans l'aviation d'ici 2050 reste donc dans l'ordre de grandeur de ces projections mais nécessite un effort de développement des énergies décarbonées au-delà des politiques actuelles.

Au-delà de la disponibilité des ressources primaires, se pose la question de la faisabilité industrielle et des conditions économiques de la production des combustibles alternatifs. Si la faisabilité technique des biocarburants et de la production d'hydrogène est d'ores et déjà acquise, les électrocarburants sont aujourd'hui encore au stade du développement. Leur production pose en particulier la question de la source de CO₂ utilisée, le graal étant de prélever du CO₂ atmosphérique, ce qui induit des problématiques techniques supplémentaires. Toutes les voies envisageables ont par ailleurs en commun d'être aujourd'hui nettement plus coûteuses que le kérosène fossile. Les perspectives d'abaissement des coûts de production constitueront par conséquent un facteur majeur dans leurs développements respectifs, facteur à considérer de pair avec les coûts nécessaires à l'adaptation des flottes et des infrastructures qui seront conséquents dans le cas de l'hydrogène. ■

10. Valeur conservative par rapport à certaines publications telles que Staples & al., 2018.

11. Source IATA

12. Source : Transport Environnement

13. En n'excluant les émissions liées à la création des infrastructures de production.

14. L'amélioration des procédés de liquéfaction ainsi que l'introduction de nouveaux procédés d'électrolyse permettent d'anticiper une augmentation de ce rendement dans les années à venir.

15. Agence Internationale de l'Énergie – World Energy Outlook, 2018.

MOBILITÉ À LA DEMANDE, MOBILITÉ URBAINE AÉRIENNE, ET MOBILITÉ AÉRIENNE AVANCÉE

par Henry de Pinval, Jean Hermetz et Arnaud Le Pape, ONERA

CONTEXTE ODM, UAM ET AAM

La mobilité à la Demande (ODM pour *On-Demand Mobility*) est actuellement en plein essor dans le monde aéronautique. Ce nouveau concept d'emploi est né de l'opportunité constituée par le développement de technologies hybrides électriques pour la propulsion et des progrès faits dans le domaine des drones, permettant d'entrevoir des configurations de véhicule susceptibles de répondre à une demande sociétale nouvelle pour un moyen de transport souple, sûr, disponible, complémentaire voire alternatif des moyens sols, et pouvant à ce titre constituer, selon ses promoteurs, une réponse à l'engorgement des réseaux routiers et ferrés des grandes mégapoles, mais aussi une réponse à des besoins plus spécifiques comme des transports médicaux ou VIP.

On attend de ces solutions de transport une grande souplesse d'emploi, une utilisation au sein des lieux d'habitation imposant des caractéristiques de décollage et d'atterrissage à minima courts, idéalement verticaux, une absence de compétences particulières de l'utilisateur

(à terme) et un impact environnemental réduit pour se conformer à la sensibilité grandissante des populations à la pollution (qu'elle soit de nature atmosphérique, acoustique, voire visuelle), qui plus est en zone urbaine.

Dans le domaine de l'aérien, le concept hérite, à de nombreux égards, d'une longue lignée de développements autour de la voiture volante ou du transport personnel (à vocation plus militaire dans certains cas), et profite des progrès fait en matière d'automatisation du vol ainsi que de l'émergence concomitante des drones (ou UAV pour *Unmanned Aerial Vehicles*). L'UAM pour *Urban Air Mobility* regroupe l'ensemble de ces utilisations d'aéronefs pilotés ou non, qui peuvent être habités (transport de passager), ou non (transport de biens, colis) dans un environnement urbain. L'UAM englobe donc un large spectre de véhicules, du petit drone pour le transport de petite charge au taxi-aérien, et ceci pour une grande variété de missions : sécurité, urgence médicale, logistique, transport.

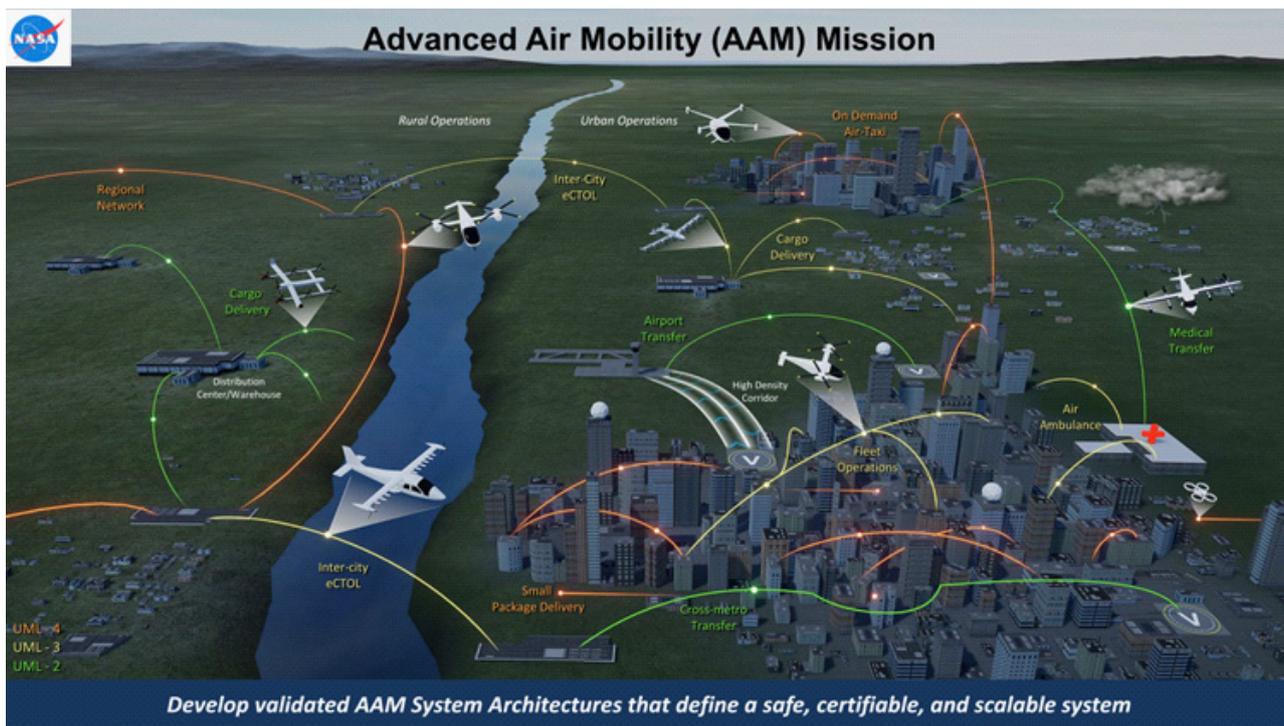


Figure 1. Vision de l'AAM selon la NASA (crédit NASA)

La NASA, acteur très impliqué sur ces différents sujets, a récemment proposé une généralisation de l'UAM dans le concept d'AAM (*Advanced Air Mobility*) qui couvre aussi bien les besoins urbains ou péri-urbains et les besoins de liaisons interurbaines, requérant des distances franchissables plus grandes, et recouvrant le marché préexistant des *Commuters*. Il embrasse, en outre, d'autres services de type cargo, par exemple, voire des activités de sécurité civile et de protection civile. La figure 1 illustre cette variété de contextes couverts par le concept d'AAM.

L'AAM est avant tout un Concept d'Opérations (CONOPS) qui associe un ensemble de véhicules rendant des services, à partir et vers des infrastructures d'accueil, et opérés au sein d'un espace aérien organisé imposant des règles de vol, des trajectoires, des compétences des opérateurs, des niveaux de fiabilité et de sûreté de fonctionnement pour assurer la sécurité au sens large des personnes et des biens. C'est la conjonction de ces composants, auxquels il faut naturellement ajouter les opérateurs, les clients et un certain nombre d'autres parties prenantes (constructeurs, ateliers de maintenance, organismes régulateurs, etc.), qui forment ensemble ce concept. On note indubitablement une forte ressemblance organisationnelle avec l'actuel Système de Transport Aérien, dont il hérite et avec lequel il se met en cohérence.

L'AAM couvre ainsi un grand nombre de missions, ou de services, qui vont du taxi aérien à des activités de travail aérien en passant par le transport régulier – navette – de passagers se rendant régulièrement d'une zone péri-urbaine, par exemple, au cœur de ville, mais également les missions non-habitées de l'UAM comme le transport de colis, le transport médical (par exemple poche de sang ou défibrillateur en cas d'urgence).

Le recensement de ces services s'appuie généralement sur une analyse des opérations actuellement menées par d'autres aéronefs, comme les hélicoptères, ce qui conduit à envisager des opérations de surveillance de lignes électriques ou d'ambulance.

Il s'appuie également sur l'analyse des besoins en déplacements de la population, besoins récurrents ou ponctuels, et sur la situation actuelle presque entièrement assurée, dans les pays développés, par des moyens terrestres (routier ou ferroviaire). Il anticipe également

des besoins de transport à la demande mal couverts à ce jour¹, de type inter urbain, c'est-à-dire reliant deux centres économiques de taille moyenne (métropoles régionales par exemple). Ce type de liaison, généralement assuré par des appareils nommés *Commuters*, reste un marché en devenir sauf dans des cas bien particuliers de desserte de zones isolées (îles) pour assurer la continuité territoriale.

LES CONCEPTS DE VÉHICULE

Ainsi, l'AAM ambitionne notamment d'être une alternative possible face à la saturation des réseaux routiers et les entreprises qui s'y intéressent établissent un argumentaire économique, en particulier sur ce type de services, qui sert ensuite de support aux choix, notamment technologiques, sur les véhicules susceptibles d'y répondre. Même si l'on peut douter de la probabilité d'un tel scénario de remplacement massif des trafics routiers par un transport aérien, il est en effet sous-jacent à nombre de développements actuels.

A ce titre un grand nombre des développements d'aéronefs se situent aux États-Unis (Terrafugia, Joby Aviation, NASA, UBER), mais aussi en Europe (City Airbus, Lilium Aviation, Volocopter, Ascendance Flight Technologies, etc.) et en Asie (Chine, Ehang). On dénombre actuellement près de 400 projets² plus ou moins aboutis de véhicules entrant dans cette grande famille de l'*Advanced Air Mobility*, soutenus pour certains par de grands groupes du secteur aéronautique, mais également automobile, et surtout par de nouveaux acteurs de type startup. Ces derniers voient dans ce changement de paradigme une occasion pour de nouveaux compétiteurs de s'y implanter à travers des solutions technologiques innovantes qu'ils espèrent développer et imposer rapidement grâce à leur agilité.

Le segment des appareils de petite capacité (jusqu'à 5 places y compris le pilote) est majoritaire pour des opérations principalement axées vers le taxi urbain ou péri-urbain. Ces véhicules visent un décollage vertical et s'appuient sur la propulsion électrique distribuée pour assurer à la fois les performances attendues, l'absence d'émissions polluantes en opération et un haut niveau de sécurité des vols. Ils en espèrent également une empreinte acoustique faible, même si ce point, essentiel,

1. Selon toutefois les grandes zones géographiques : le maillage en voies ferrées en Europe occidentale, par exemple, est nettement plus dense que dans d'autres régions du Globe.

2. Le site <https://evtol.news/> recense ces différents projets quelle que soit leur maturité

est loin d'être acquis.

Pour l'interurbain, où la performance en croisière devient primordiale, les configurations proposées s'apparentent plus aux appareils conventionnels (voilure fixe empennée), allant de l'électrification d'appareils existants jusqu'à des solutions plus originales, fondées sur une distribution de la propulsion afin de bénéficier d'effets multifonctionnels apportant des avantages opérationnels (soufflage voilure notamment pour réduire les distances de décollage et d'atterrissage).

Du point de vue réglementaire, l'EASA en Europe a lancé un vaste chantier de rédaction d'une future CS (*Certification Specifications*) ciblant les véhicules de type VTOL³. En cours d'élaboration, celle-ci détoure les futures attentes en matière de certification, sur le principe du dernier amendement de la CS-23 (document définissant les conditions de navigabilité pour les aéronefs légers de moins de 5,7 t, incluant la catégorie Commuter jusqu'à 8,6 t et 19 passagers), et fixe les niveaux requis de fiabilité d'ensemble selon le type de mission et la nature des zones survolées. Ainsi, ce document définit deux catégories de certification : basique (« basic ») et renforcée (« enhanced »). Cette deuxième certification est nécessaire pour des opérations au-dessus de zones fortement peuplées ou pour des opérations de transport commercial. En catégorie renforcée, les pannes catastrophiques (résultant en une issue fatale) doivent survenir avec une probabilité moindre qu'une sur un milliard par heure de vol. En catégorie basique, cela dépend du nombre de passagers ; par exemple avec 0 ou 1 passager, cette probabilité doit être inférieure à un sur un million par heure de vol.

QU'EN EST-IL EN FRANCE ?

Les acteurs français se lancent aussi dans l'UAM ou l'AAM dans la perspective des nouveaux débouchés que cela pourrait ouvrir. On peut citer parmi les grands groupes aéronautiques, les démonstrateurs coté Airbus, dont les équipes françaises contribuent, même si les démonstrateurs visibles sont réalisés par des équipes hors France : le CityAirbus par Airbus Helicopters, principalement porté du côté Allemand, et le Vahana par Airbus A3 en Californie dont l'équipe a maintenant été dissoute. Du côté véhicule, en dehors de la start-up Ascendance

Flight Technologies qui travaille sur un appareil de type eVTOL, c'est plutôt le commuter CTOL qui est visé avec des sociétés comme par exemple Voltaéro, Aura Aéro, Avions Mauboussin ou Blue Spirit Aero.

Du côté des équipementiers, Safran est très présent sur la propulsion, les motorisations électriques et les sources d'énergie hybride. De nombreuses PME et TPE se positionnent également sur des équipements type piles à combustible, moteurs électriques, électronique de puissance, etc.

Les opérateurs de transport s'intéressent aussi au sujet et on peut citer en France l'initiative d'ADP et de la RATP autour de l'aérodrome de Pontoise pour mettre en place un écosystème favorable à l'étude des infrastructures et des opérations de véhicules de type eVTOL.

Certaines métropoles, et des régions sont également actives dans ce paysage. Ainsi en est-il par exemple, dans la zone géographique du pôle de compétitivité Aerospace Valley :

- Toulouse Métropole, associé à différents partenaires, parmi lesquels Airbus, l'ONERA, et d'autres, a remporté le projet VILAGIL, sur l'appel à projets Territoires d'Innovation. Le projet vise la décarbonation du territoire, la mobilité intelligente, et singulièrement l'UAM.
- la région Nouvelle-Aquitaine porte également une ambition sur l'UAM, avec des acteurs de son territoire, et par exemple une étude de faisabilité en cours sur l'UAM.

Ces initiatives sont accompagnées par des travaux de R&T soutenus par la puissance publique, en particulier la DGAC, auxquels l'ONERA participe activement. Ils couvrent de nombreuses thématiques afin de répondre aux enjeux posés par l'ambition de faire voler des aéronefs dans un milieu urbain et péri-urbain pour des missions variées. Les régions sont également actives pour fédérer et soutenir les acteurs de leur territoire et leurs projets d'aviation légère décarbonée, comme l'initiative MAELE du pôle de compétitivité Aerospace Valley et ses appels à manifestation d'intérêt.

3. VTOL signifie Vertical Take Off and Landing. On ajoute souvent un « e » pour le caractère électrique de la propulsion, et la plupart des véhicules AAM sont soit des eVTOL soit des eCTOL (CTOL pour Conventional Take-off and Landing). On parle également de STOL (Short Take-off and Landing) et eSTOL

QUELLES RECHERCHES POUR QUELS VEROUS ?

Le déploiement d'un ou plusieurs services aériens en environnement urbain et péri-urbain opérés par de nouveaux véhicules, nouveaux dans leurs configurations, leurs modes de propulsion et bien d'autres aspects, impliquent de nombreuses difficultés scientifiques et techniques. La NASA a proposé l'organisation de la figure 2 qui résume bien l'ampleur des sujets à aborder : les problématiques au niveau des véhicules (en rouge), les problématiques au niveau de l'intégration dans l'espace aérien (en bleu) et les problématiques liées à des enjeux sociétaux (en violet).

LA PERFORMANCE POUR RÉALISER LA MISSION

Le premier enjeu est d'être en mesure de concevoir des aéronefs capables de réaliser les missions envisagées de façon sûre, efficace énergétiquement et économiquement soutenable. Les près de 400 véhicules proposés par les différents acteurs et mentionnés plus haut illustrent que l'espace d'exploration est important.

La configuration de l'aéronef est évidemment un point central avec par exemple le choix du nombre et de la position des rotors (pour la capacité VTOL), le nombre et

les positions des hélices (qui peuvent être les rotors de sustentation, et vice-versa) pour la propulsion ou encore l'utilisation d'une ou plusieurs ailes pour la sustentation en croisière.

L'aérodynamique du véhicule pour les différentes phases de vol devra être minutieusement étudiée, avec une problématique centrale autour des interactions entre hélices (ou rotor) et surfaces portantes. Cette aérodynamique est directement couplée aux qualités de vol de l'appareil et ce dans une enveloppe de vol particulière puisque couvrant des phases de vol vertical, d'avancement mais aussi de transition. Ainsi, le choix des surfaces de contrôle et la façon de piloter l'appareil, à travers des lois de pilotage faisant appel à des calculateurs actionnant ces surfaces en association avec les rotors et hélices, sont autant de points cruciaux.

Enfin, tout ceci devra prendre en compte le mode de propulsion et l'énergie utilisée (le vecteur électrique est central pour la distribution de la puissance de propulsion à bord, électricité en provenance de batteries, de piles à combustible, ou de solutions d'hybridation) qui aura un impact au premier ordre sur la configuration, la masse de l'appareil mais aussi son pilotage en association avec le management de l'énergie, et ses opérations.

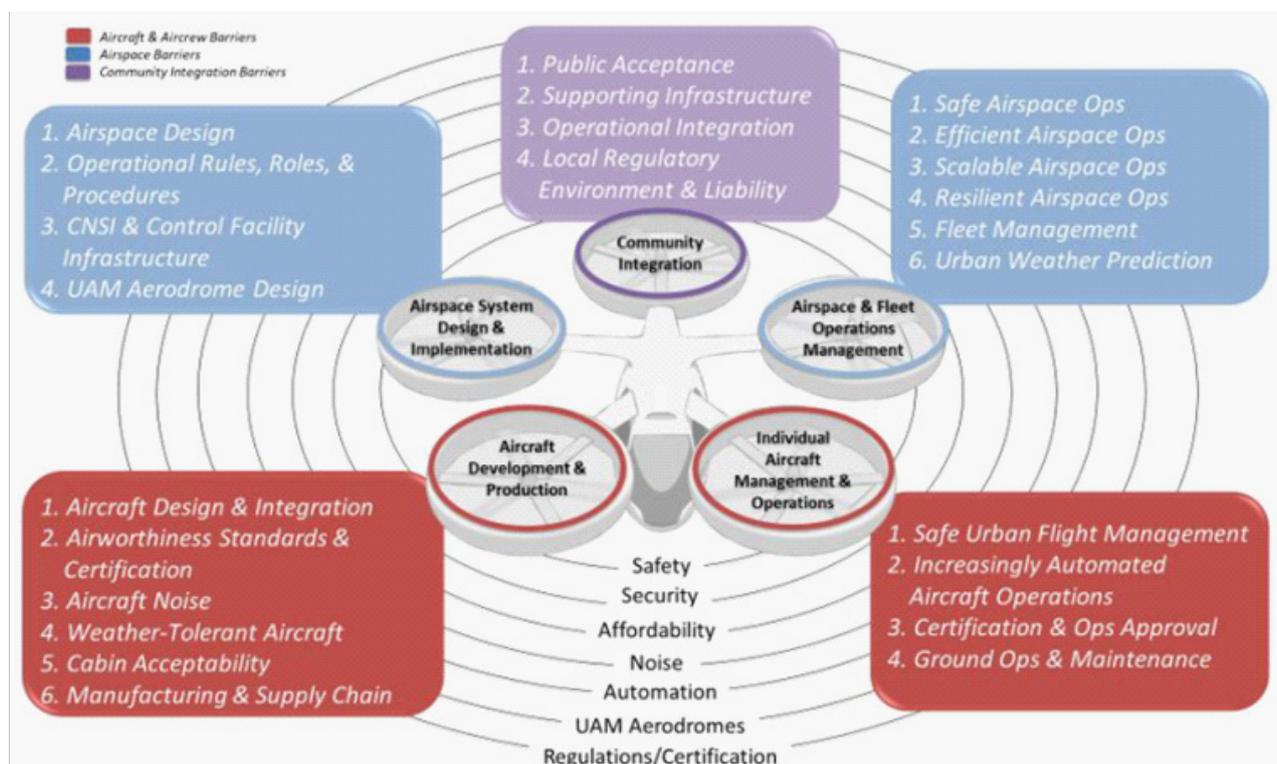


Figure 2. NASA UAM framework barriers

LA SÉCURITÉ ET LA SURETÉ

L'enjeu est ici de définir et prouver le bon niveau de sécurité garantissant que ces nouveaux services ne vont pas faire peser de risque inconsidéré pour les utilisateurs mais aussi pour les populations survolées. Le processus et les règles de certifications de ces nouveaux aéronefs sont en cours d'instruction par l'EASA et la FAA, comme évoqué précédemment, et couvrent de très nombreux aspects. On peut citer par exemple : la capacité à voler dans certaines conditions météorologiques (givre, foudre), les risques liés à la compatibilité électromagnétique entre les systèmes et la chaîne d'énergie ou encore la résistance au crash (survivabilité des équipages et des biens).

L'ambition d'opérer à terme des véhicules autonomes sans pilote pose aussi des questions de sécurité comme la protection vis-à-vis de malveillances (cybersécurité) mais aussi la capacité à éviter des obstacles ou de possibles collisions (voir et éviter) en adaptant la trajectoire de vol aux circonstances rencontrées : ce dernier point est d'autant plus primordial qu'il s'agit de décoller de zones urbaines et d'y atterrir, ces lieux étant par essence caractérisés par la présence d'obstacles de natures diverses (immeubles, antennes, poteaux et câbles etc.) et générateurs d'une aérologie locale perturbée et difficilement prévisible.

Cela nécessite la mise au point de différents capteurs et systèmes fiables et robustes pour le vol et la navigation autonome, et une compréhension fine de l'interaction entre un éventuel équipage à bord ou au sol, des opérateurs distants (par exemple contrôleurs aériens) et ces fonctions embarquées qui assurent à l'appareil une certaine autonomie de décision et d'action.

L'INTÉGRATION DANS LE TRAFIC AÉRIEN

Outre les aspects mentionnés ci-avant sur la faculté, pour l'aéronef, de « voir et éviter » les autres véhicules peuplant l'espace aérien et les obstacles, des concepts d'insertion de ces véhicules dans le trafic devront être définis de façon plus précise. Les routes qu'ils emprunteront, l'interaction avec l'aviation traditionnelle, la gestion des aléas compliquée par la difficulté à définir ou trouver des zones de posée d'urgence, le régime de suivi par les gestionnaires traditionnels de l'espace aérien, la mise en place concrète du « U-space », dédié aux opérations de drones à basse altitude, etc. Tous aspects qui méritent encore des développements pour assurer

une coexistence sûre entre ces nouveaux acteurs de l'espace aérien, et ceux qui y évoluent déjà.

L'ACCEPTABILITÉ ET L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Le vol urbain exige une attention particulière à la perception qu'auront les utilisateurs et les populations confrontés à la cohabitation avec ces services. L'enjeu est ici d'assurer un impact visuel et auditif le plus faible possible. Les émissions sonores sont un des principaux verrous de l'acceptabilité et sont déjà aujourd'hui un facteur limitant pour les opérations des hélicoptères. Les aéronefs devront être les plus silencieux possibles mais il s'agira également de comprendre la propagation du bruit dans un environnement urbain complexe par nature et la perception de ces émissions sonores dans le bruit de fond urbain. Enfin, le déploiement de service de type taxi-urbain devra assurer aux voyageurs un niveau de confort en terme de bruit interne et de vibrations.

L'acceptabilité de ces nouveaux services sera aussi confrontée aux légitimes exigences sociétales sur la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre et la pollution locale. Au-delà de cet impact en opération, il s'agit également de se conformer aux exigences de développement durable en se préoccupant de ces aspects tout au long du cycle de vie du véhicule et de ses besoins récurrents, notamment en énergie. Ces aspects rejaillissent directement sur les choix technologiques opérés, tant sur les sources d'énergie, avec par exemple le recyclage des batteries, la production d'électricité pour les charger ou d'hydrogène pour l'alimentation de piles à combustible, que sur les matériaux employés pour la structure des appareils (majoritairement de type matériaux composites).

LES INFRASTRUCTURES

Les infrastructures sol représentent aussi un enjeu fort pour ces concepts. Souvent nommés « vertiports », les infrastructures qui accueilleront véhicules et passagers devront concilier des objectifs de sûreté (contre de possibles actions malveillantes), de sécurité (avec une excellente fiabilité des systèmes concernés), et encore d'efficacité (par exemple pour permettre un chargement rapide des passagers et en se situant à des nœuds d'échange avec d'autres moyens de transport ou de déplacement, dans une perspective d'intermodalité fluide). La problématique de la logistique associée aux rechargements et/ou aux changements de batteries est également essentielle.

Bien qu'ils ne s'agissent pas de « vertiports », la France dispose d'un maillage unique en aérodromes ⁴ de tailles variées, généralement à proximité d'agglomérations. Cette situation s'avère être un atout considérable dans la perspective de développement de l'AAM, principalement pour son volet connexion interurbaine, mais également comme base logistique et de maintenance pour les autres usages.

QUELLES ACTIVITÉS À L'ONERA ?

L'ONERA, de par ses missions, assure à la fois un rôle d'expert auprès des services de l'État et de développement des connaissances disciplinaires et métiers à même d'aider l'industrie à développer des technologies et produits innovants.

Le graphique de la figure 3 propose une vision d'ensemble des sujets techniques d'intérêt majeur portés par ces véhicules et sur lesquels l'ONERA s'investit.

L'intérêt porté sur ces différents sujets de recherche a conduit l'ONERA à inscrire dans la durée une feuille de route spécifique, pour assurer la cohérence d'ensemble de son implication et des investissements correspondants.

UN RÔLE D'EXPERTISE AUPRÈS DE LA DGAC

L'ONERA remplit cette mission d'expertise auprès de l'État dans le domaine des drones par un accompagnement vers la mise en place de solutions techniques pour les nouvelles opérations « risquées », qui permettront les avancées réglementaires. Ce schéma se retrouve sur les domaines évoqués ici, qui se recouvrent en partie, sans se confondre, avec le domaine des drones.

Ainsi de l'étude MOSQUITO (« MObilité et logiStiQue Urbaine - Pré étUde vers une future règlementatiOn »), où l'ONERA, avec Airbus Helicopters (mandataire), Safran Electronics & Defense et Thales AVS, étudient quatre dimensions essentielles de l'UAM : la sécurité, la cybersécurité, les problématiques électromagnétiques, et l'acoustique. L'ONERA y est notamment très impliqué sur ces deux derniers sujets.

Dans la convention d'expertise et de recherche PHYDIAS (convention portant sur des « Drones Innovants pour de nouvelles Applications et une Sécurité accrue »), financée par la DGAC à l'ONERA, ce dernier étudie des aspects complémentaires des domaines mentionnés ci-dessus.

Dans cette optique, la DGAC a aussi demandé à l'ONERA de porter un groupe de travail sur la certification. Ce «GT

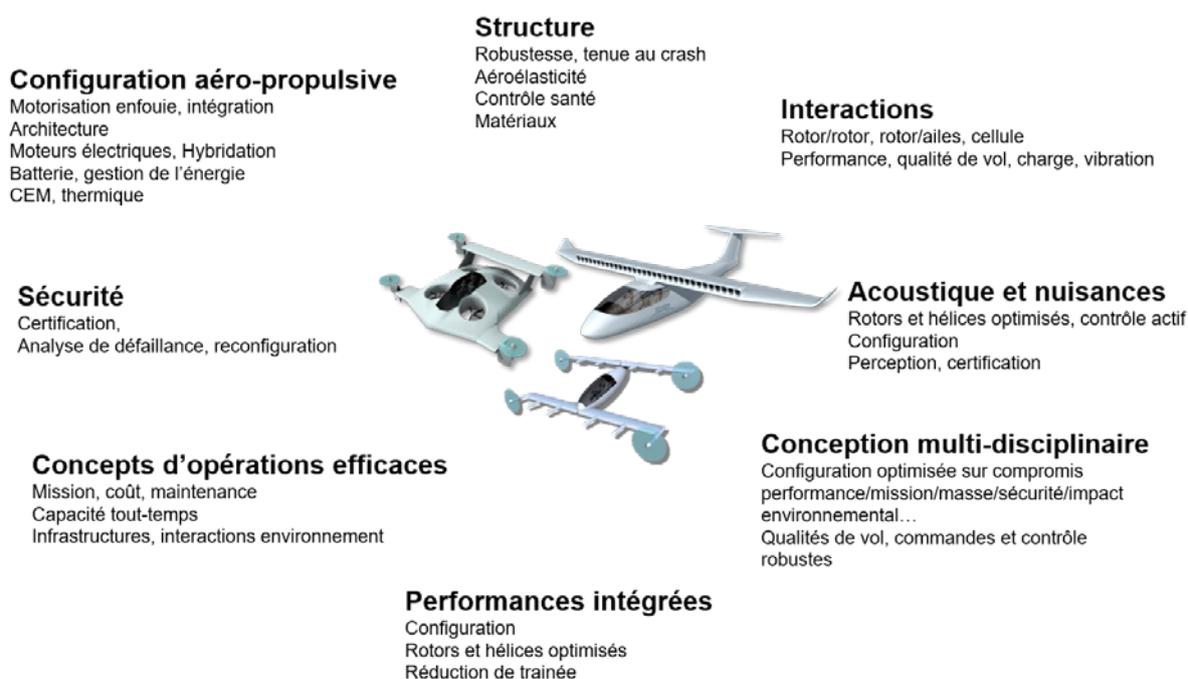


Figure 3. Autour des concepts issus du PRI Safran Tech et d'AMPERE, les thèmes de recherche abordés à l'ONERA

4. Plus de 500 en France

certification », qui rassemble un grand nombre d'acteurs français concernés par la certification des drones et des VTOLS pour l'UAM, a pour mission de coordonner la vision française sur le sujet, notamment sur les textes réglementaires qui sont constitués par l'EASA.

Par ailleurs l'ONERA travaille dans PHYCIEL, une autre convention DGAC, sur les « Contraintes d'Intégration Électriques » de ces aéronefs en se focalisant sur les phénomènes physiques essentiels qui conditionnent les règles d'intégration. L'approche multidisciplinaire retenue, numérique et expérimentale doit permettre d'en déduire à la fois des diagnostics originaux, mais encore des configurations optimales pour la sécurité.

UNE IMPLICATION EN RECHERCHE ET TECHNOLOGIE AUX CÔTÉS DE L'INDUSTRIE

Avec Airbus Helicopters (mandataire), l'ONERA travaille depuis fin 2020 sur un projet DGAC, MOTUS (« Minimisation de l'impact acoustique Opérationnel des VTOLS en conditions UrbaineS »), qui concerne l'acoustique des VTOLS (hélicoptères tout comme véhicules pour l'UAM). Ce projet vise à comprendre les mécanismes d'acceptabilité, améliorer les outils de prédiction, et maturer des technologies de réduction du bruit.

Un Projet de Recherche et d'Innovation (PRI) pluriannuel a été mis sur pied entre Safran et l'ONERA de façon à travailler en commun sur quelques sujets technologiques-clés de ces configurations. L'objectif poursuivi est de mieux comprendre l'impact de certains choix, liés à la configuration des aéronefs ou aux technologies envisagées pour leur propulsion, sur le dimensionnement final, et d'en tirer des recommandations et des spécifications réalistes pour la conception des principaux équipements de propulsion. Deux volets ont été abordés, l'un relatif aux configurations eVTOL et l'autre aux configurations conventionnelle eCTOL, toutes deux cependant exploitant le principe de propulsion hybride électrique distribuée. L'ONERA a plus particulièrement apporté son expertise dans les domaines de l'aérodynamique, notamment pour la prédiction des effets d'interaction hélice-voilure, de l'acoustique, des structures pour le dimensionnement voilure, de la mécanique du vol (performances, qualité de vol et lois de contrôle), enfin de la conception d'ensemble (OAD⁵).

Sur ce même sujet de la propulsion distribuée, l'ONERA accompagne Airbus dans son activité de conception aérodynamique de l'installation motrice et de définition des lois de pilotage, qu'il mène au sein du projet DGAC Ottawan portant sur le démonstrateur en vol ecoPulse (conçu sur une base de TBM900), projet rassemblant également Daher (leader), et SAFRAN.

L'ONERA participe également à l'initiative évoquée plus haut avec ADP autour de l'aérodrome de Pontoise. Cette initiative est encore en construction, mais devrait permettre de construire des solutions sur les principaux aspects essentiels de l'UAM (développement de véhicules, infrastructures, opérations, intégration dans l'espace aérien, et acceptabilité). L'ONERA pourra y contribuer sur ces différentes dimensions, et s'est proposé en particulier sur les problématiques acoustiques.

Enfin, l'ONERA accompagne, grâce à son expertise multidisciplinaire, un certain nombre de startups développant des propositions de véhicules répondant aux concepts d'opération de l'UAM, de façon à les aider à identifier et lever certains des points critiques dans les domaines technologiques et scientifiques cités précédemment.

DES INVESTISSEMENTS PROPRES

En partenariat avec CEA Tech, l'ONERA a mené en 2012-2013 quelques travaux de prospective relatifs à la propulsion électrique pour les aéronefs. Ils en ont détourné la faisabilité et le domaine d'intérêt, et ont identifié les thématiques de recherche à pousser pour aider à son émergence.

Parmi ces technologies, la propulsion distribuée tient une place centrale.

Sur cette base, l'ONERA a lancé un premier projet sous financement Carnot dédié à l'étude d'une solution de propulsion originale d'hyper-distribution de fans électriques, disposition dont on attend un gain substantiel en portance à basse vitesse par soufflage voilure (voir Figure 4). Nommé AMPERE (pour *Avion à Motorisation réPartie Electrique de Recherche Expérimentale*), ce projet à la fois numérique et expérimental s'est focalisé sur deux des challenges identifiés, d'une part l'intégration motrice et le bilan aéropulsif d'ensemble, d'autre part le contrôle de l'aéronef à travers la combinaison des

5. Overall Aircraft Design

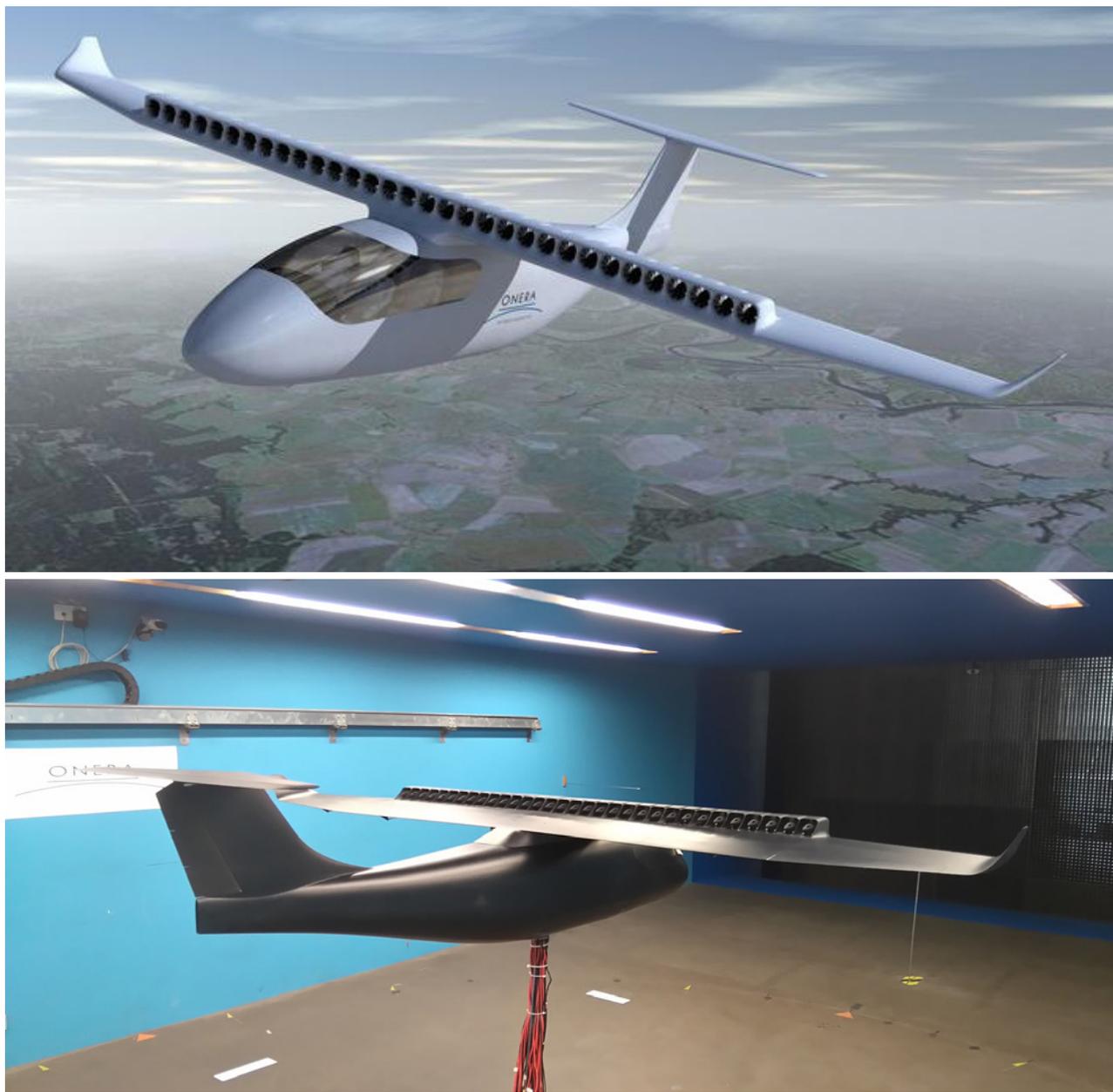


Figure 4. AMPERE et sa maquette (échelle 1/5 soit 2,90 m d'envergure) dans la soufflerie L2 (centre ONERA de Lille)

gouvernes conventionnelles et de la motorisation. Son bilan confirme l'effet majeur du soufflage tel qu'attendu avec un accroissement notable du domaine de vol contrôlé de l'appareil, notamment pour les basses vitesses. Il conduit aussi à l'identification de règles de dimensionnement, au niveau aéronef, spécifiques à ce type d'installation motrice pour l'obtention d'un bon compromis entre basse vitesse et performances de croisière.

Un second Projet de Recherche, plus spécifiquement dédié à l'étude aérodynamique fine de l'intégration de fans sur voilure, a également été engagé (voir Figure 5). Nommé BLISARD (pour *Boundary Layer IngeStion and*

AeRodynamic Design), ce projet s'intéresse aux configurations aéro-propulsives réparties avec ingestion de couche limite (et donc potentiellement enterrées) en associant études numériques et essais aérodynamiques en soufflerie de recherche (dans la soufflerie L1 du centre ONERA de Lille, voir Figure 5). Le but de l'essai était de caractériser les coefficients aérodynamiques autour et au-delà du décrochage pour mieux en connaître le comportement. Il a ainsi été possible de quantifier les gains et pertes potentiels associés à une telle architecture aéro-propulsive et de mettre en évidence les phénomènes et paramètres clés nécessaires à l'intégration de ce type d'architecture sur un aéronef.

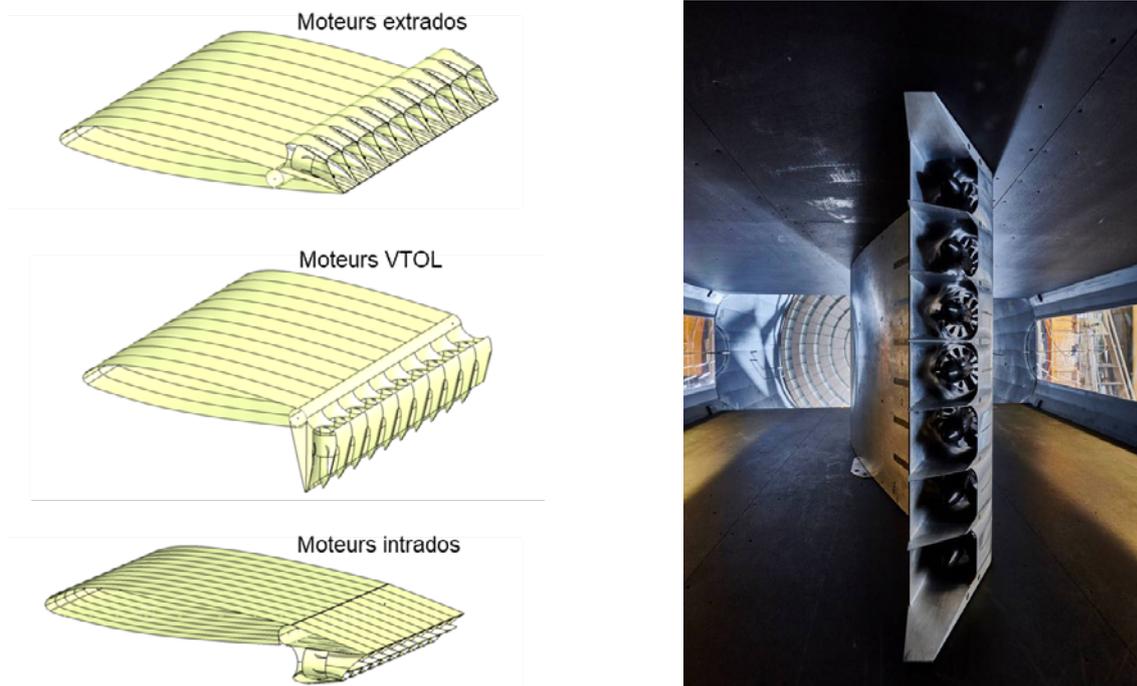


Figure 5. Maquette BLISARD, ses trois modes d'utilisation et son installation dans le soufflerie L1 du centre ONERA de Lille

Ce projet, comme AMPERE, contribue à la constitution d'une base de connaissances qui conduit à la proposition de configurations innovantes, comme DRAGON (pour Distributed fans Research Aircraft with electric Generators by ONERA), étudié par l'ONERA dans le cadre de CleanSky 2.

Au-delà de ces activités dédiées à l'UAM, nombre d'autres actions menées à l'ONERA, sur le sujet des hélicoptères, des drones, ou même d'autres domaines, contribuent au développement de connaissances nécessaires au déploiement de solutions pour l'UAM : acoustique sur les hélicoptères ; « voir et éviter » pour les drones ou d'autres aéronefs ; technologies et algorithmes pour l'autonomie des drones ; facteurs humains et interactions ; lidars dédiés aux mesures aérologiques, méthodologies de conception multidisciplinaire et multifidélités ; travaux menés sur l'U-space avant que le sujet UAM devienne prééminent, etc.

CONCLUSION

Le développement rapide d'un certain nombre de technologies a rendu envisageable le déploiement de ces nouveaux concepts de mobilité que sont l'ODM, l'UAM, ou encore l'AAM. Il en résulte un très grand dynamisme de ce secteur, qui voit régulièrement émerger de nouveaux projets de véhicules aériens et de nouveaux entrants. Pour atteindre la maturité nécessaire à leur exploitation, pour répondre aux attentes sociétales et au besoin de sécurité croissant de nos contemporains, des développements scientifiques et techniques supplémentaires sont nécessaires et Il faudra du temps pour atteindre les niveaux de sécurité exigés et garantir la faible empreinte acoustique compatibles avec un déploiement de ces aéronefs. L'ONERA possède une expertise technique sur la plupart des domaines concernés, qui lui permet de remplir sa double mission d'innovation au profit de l'industrie et d'expertise auprès de l'État (ici, la DGAC). Il l'exerce pleinement au profit de ce nouveau concept d'opérations aériennes à travers de nombreuses activités dont la montée en puissance devrait se poursuivre dans les années à venir. ■

UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN

par Michel Aguilar, ingénieur honoraire de la DGA, membre de la commission technique Aviation légère

La VFS (*Vertical Flight Society*) américaine, qui recense entre bien d'autres fonctions tout ce qui décolle (et atterrit) verticalement, a donc recensé à ce jour (début 2021) (<https://evtol.news/aircraft>) sur toute la planète plus de 350 projets développés ou en développement. Quasiment tous ont cette particularité du décollage vertical grâce à la technologie des hélices (rotors) entraînées par des moteurs électriques. Le seul et unique « job » des moteurs électriques est de proposer de la puissance disponible sur un arbre en rotation. Mais ces kilowatts le doivent à l'énergie stockée dans une technologie en continuelle évolution : la batterie. Avantage majeur de cette technologie électrique : zéro rejet polluant en fonctionnement et discrétion assurée sur la pollution sonore. Inconvénient majeur de cette technologie : le recyclage des batteries, l'évaluation de son impact réel depuis le « 0 » jusqu'au « 1+ » de sa fabrication (le « + » pour son recyclage), mais aussi sa densité énergétique. Certes sur ce dernier point ses capacités énergétiques sont en constante progression, mais très loin derrière celles contenues dans 1 kg de kérosène. En tenant compte des rendements très faibles des moteurs thermiques, de l'ultra haut rendement des moteurs électriques, et des réserves énergétiques des batteries (ne jamais les vider complètement !) le gap est tout de même encore à l'avantage indéniable du carburéacteur, et dans un rapport de 1 à 16 ! Enfin, aux hautes altitudes (faible température), les batteries voient leur rendement chuter vertigineusement.



Mais au regard de l'étonnante capacité inventive (résilience) du monde de l'aéronautique, sa R&D a proposé très avantageusement de coupler ce moteur

électrique à un moteur thermique (turbomoteur ou autres) totalement optimisé pour justement... recharger en temps réel et essentiellement en croisière, les dites batteries. La propulsion étant alors assurée par ces moteurs thermiques pour une vitesse et une autonomie acceptables, mais dont le rendement malgré ses énormes progrès reste très faible, d'où une consommation contraire au sens de l'Histoire.

Ce concept hybride demeure tout de même très séduisant attendu que les moteurs électriques sont uniquement activés lors des décollages/atterrissages de sorte à rester quasi « invisibles » pour les oreilles très (trop ?) sensibles des riverains. Des essais via l'e-Fan (pionnier dans l'électrique avec son cahier des charges), et le Voltaéro (abouti dans l'hybride) en sont de dignes représentants. Le tout électrique restant très viable pour la formation des pilotes dont les tours de piste incessants seront acceptés par les riverains.

Et les projets ne manquent pas comme peut en témoigner ce simple panorama extrait de certains projets actuels développés ou en cours. Et point important : un « couplage » s'est établi entre les constructeurs de véhicules roulants (voiture) et les véhicules volants :

QUELQUES REMARQUES AVANT D'ABORDER LE NOUVEAU CONCEPT DU S-UAM

Si voler, se soustraire aux forces de la gravité, semble inscrit au plus profond du génome de l'Homme, force est de constater que tout commence par un rêve mais plus, peut-être, pour relever le défi lancé par les oiseaux et autres volatiles qui nous attirent vers le haut. À l'évidence la présente décennie 20-30 devrait témoigner de ce rêve à la portée de tous, mais en arrangeant la Matière au point de la rendre « plus légère que l'Air » ! Et qui n'a jamais éprouvé ce sentiment très fugace du moment unique où, aux commandes d'un petit avion, les roues quittent la piste, ne peut comprendre que désormais l'Homme ainsi fait n'aura de cesse de renouveler cette impression comme un « paradis perdu » ! Il n'est que de rappeler cette analyse du grand Leonardo da Vinci : « Une fois que vous aurez goûté au vol, vous marcherez à jamais les yeux tournés vers le ciel, car c'est là que vous êtes allés, et c'est là que toujours vous désirerez ardemment retourner »

UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN



APRÈS LE RÊVE, LA RÉALITÉ : QU'EN EST-IL EN CE DÉBUT DE 21^{ÈME} SIÈCLE ?

Nous le disions en début de rencontre, plus de 350 projets développés ou en développement sont dénombrés sur tous les continents, mais quasiment TOUS sont dotés d'hélices ou de rotors, et donc entraînés par des moteurs électriques avec les avantages et les inconvénients évoqués ci-dessus. Imaginons dans un premier temps (et les temps sont proches pour y parvenir) que des milliers d'aéronefs pour « monsieur/madame-tout-le-monde » sillonnent les villes – on parle alors d'UAM pour *Urban Air Mobility* – quid alors de la sécurité qui, même avec le développement de l'IA (intelligence artificielle) – aura besoin de beaucoup de temps pour rassurer le Citizen. Sans parler de ce bourdonnement incessant qui enveloppera la cité.

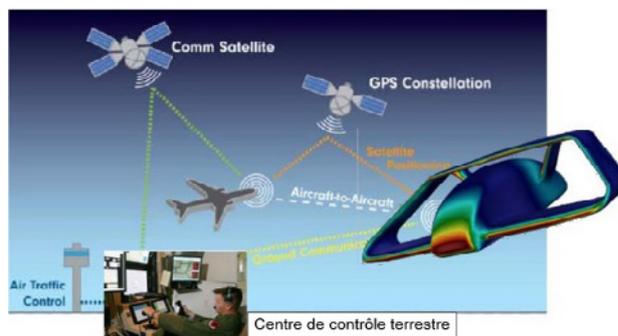
Le concept du s-UAM pourrait-il apporter une solution pérenne ?

QUID DU S-UAM ?

Le « s » de s-UAM est en réalité l'initial de « short », c'est-à-dire court, proche, à proximité. Ainsi, l'aire de décollage/atterrissage de cet aéronef de type VTOL (Vertical Take Off and Landing) sera positionnée à l'orée de la cité, c'est-à-dire à moins de 30 km du centre. Cette aire sera aménagée de sorte à se rendre quasi invisible aux oreilles sensibles des riverains locaux. De plus,

chaque aire sera espacée en moyenne de 100 km pour doter les villes petites, grandes ou moyennes de ce type de mobilité.

Des stations sol seront réparties sur tout le territoire dont le chef de station sera aussi pilote de drone. Ainsi, chaque aéronef sera tracté en permanence sur les écrans radars et/ou via le GPS comme déjà il apparaît sur les stations civiles et militaires. Toutes les caractéristiques du vol y seront affichées (vitesse, altitude, niveau de carburant, trajectoire en 3D, nombre de passagers, etc.), et sur une représentation holographique.



Point très important : la coopération entre le roulant et le volant s'intensifie essentiellement pour des raisons de maîtrise réciproque. En effet, pendant que les constructeurs de véhicules roulants (voitures, et sous peu, les camions) sont proches de maîtriser la technologie du pilotage automatique (aidé en cela par les développements « supersoniques » de l'intelligence artificielle !),

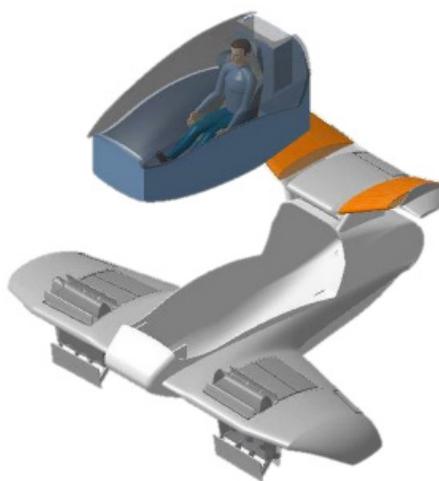
les constructeurs de véhicules volants sont, quant à eux, en passe de réussir le pari des aéro taxis et des vertiports (aires de décollage/atterrissage vertical).

Reste à persuader les futurs passagers de prendre place dans un « robot volant », ce qui n'est pas immédiat. Mais les études d'acceptation de ce type de mobilité aérienne lancées par les géants de l'aéronautique (Airbus, Boeing, etc.) indiquent bien que si quelques poches de résistance essentiellement psychologique persistent (la confiance est désormais totale sur le plan technologique), une convergence semble tout de même se profiler.



Ainsi, fort de toutes ces indications, le s-UAM proposera en premier lieu une formation type « permis-d'être-conduit » de cette nouvelle mobilité en effectuant quelques heures dans un simulateur afin de s'y familiariser. Un instructeur s'emploiera à répondre à toutes les questions, et notamment sur la sécurité en cas de panne irréversible. Sans en augmenter l'impact anxiogène, il sera précisé que dans ce cas extrême le chef de station sol reprendrait « la main » pour devenir à son tour le pilote de cet aéronef, non visible à bord mais acteur très compétant au sol et en contact radio permanent avec le « commandant de bord » nommé ainsi dès que ce dernier prendra place dans ce nouveau mode de déplacement, et ce afin d'identifier un point d'impact sécurisé.

Un parachute sera alors libéré réduisant très fortement la vitesse de chute de l'aéronef, et à 300 mètres sol environ, la capsule passagers sous parachute se détachera du porteur de telle sorte que sa vitesse de chute se réduise d'autant, et à environs 100 mètres sol, un air bag sera déployé amortissant totalement l'impact terrestre.



Le s-UAM pourrait très bien caractériser la rencontre du « 2 » et du « 3 » en dimension, s'entend... En effet, la voiture électrique composée de la capsule passagers et du chariot électrique se présente alors comme un taxi commandé depuis son téléphone portable, et dont l'autonomie ne dépassera pas les 100 km à une vitesse maximum de 60 km/h. Destination : aire de décollage. Parvenu sur cette aire : plongée dans le sous-sol afin d'échanger le chariot pour des ailes qui viennent se clipser sur la capsule. Le décollage est alors programmé conformément à la commande initiale.

Parvenu à destination le processus s'inverse : atterrissage sur l'aire sise toujours en bordure de cité, échange des ailes pour un chariot électrique avec possibilité (mais dès la réservation) de conduire cette désormais voiture électrique, si et seulement si en possession du permis de conduire, jusqu'à la borne de rechargement située au plus près du lieu de rendez-vous en Cité.

Et la propulsion ? Le s-UAM est rendu possible grâce à son propulseur de rupture technologique : le thermoréacteur, dont le POC (Proof of concept) a été démontré expérimentalement en 2014 au sein d'un consortium composé de Safran Helicopter Engines, de Comat Aerospace et du laboratoire Pprime de Poitiers dans le cadre du programme RAPID de la DGA. La France (2016), les États-Unis (2018) et le Japon (2017) ont déjà délivré le brevet thermoréacteur.

UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN

Le prochain article reprendra les caractéristiques essentielles de ce propulseur : combustion à volume constant (CVC), encombrement réduit, introduction d'une faible proportion d'hydrogène, réducteur acoustique,

gain en consommation à 2 chiffres, dispositif multiplicateur de poussée, aerospike, allumage thermique pour ne décrire que les points essentiels.



Réservation

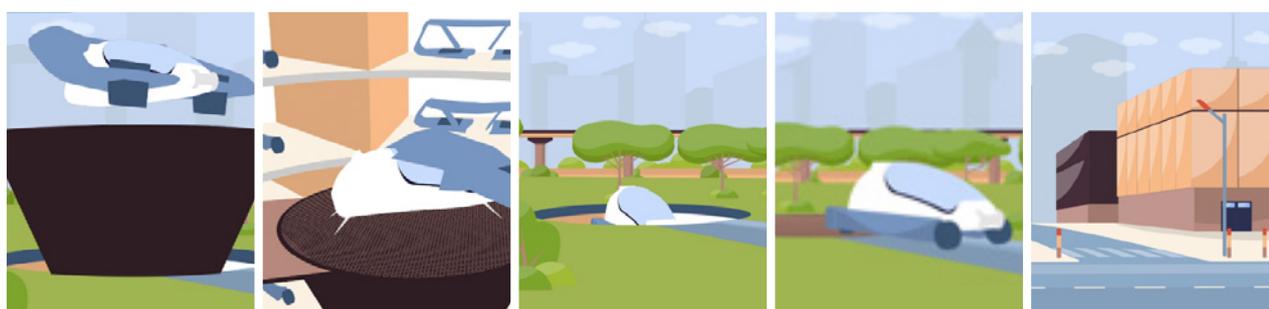
Taxi-autonome

Aire de décollage

Préparation de la mission

Décollage

Altitude : 3000m maxi
 Vitesse de croisière : 200 km/h
 Distance franchissable : 800 km maxi



Arrivée à destination

Adaptation du chariot électrique

Taxi autonome ou...

Voiture électrique

« On time... »



michel.aguilar@xplorair-aerospace.com

Sur demande, possibilité de recevoir l'adresse de téléchargement (48 Mo) de cette animation. ■

LE THERMORÉACTEUR CVC : UNE RÉVOLUTION DANS LE MONDE DE LA PROPULSION ?

par Michel Aguilar, ingénieur honoraire de la DGA, membre de la commission technique Aviation légère

L'aéronautique fait face à un nouveau défi d'envergure avec la nécessité de réduire à marche forcée son empreinte environnementale. L'innovation incrémentale ne suffit plus et des solutions technologiques en rupture sont indispensables. La combustion à volume constant (CVC) fait partie des pistes investiguées.

TECHNOLOGIE DU 20^{ÈME} SIÈCLE

Depuis plus de 100 ans, la brique essentielle de l'aéronautique, le moteur, qu'il soit à pistons ou à réaction, a bénéficié de façon ininterrompue de perfectionnements qui ont permis d'augmenter sans cesse sa durée de vie, et de réduire de façon continue la consommation, les émissions de NOx en particulier, et le bruit. Parallèlement l'aérostructure et l'avionique bénéficiaient des progrès sur les matériaux, l'électronique et l'informatique.

Grâce à ces progrès, le rendement thermopropulsif atteint les 45% ce qui est proche de l'asymptote. Autrement dit, plus de 55% du carburant consommé réchauffe la planète. Certes, toutes les grandes entreprises aéronautiques repoussent cette limite en développant la soufflante ou « gros ventilateur » (taux de dilution de 10-12 actuellement, et supérieur à 15 pour la prochaine génération) au point que ces hélices carénées présentent des dimensions qui les rapprochent fortement du sol imposant alors une traînée accrue, une masse augmentée, mais avec pour avantages de réduire la puissance acoustique et la consommation : les moteurs deviennent sobres et « silencieux »

TECHNOLOGIE DU 21^{ÈME} SIÈCLE

Tous les motoristes et avionneurs de la planète savent que pour atteindre des gains en consommation à deux chiffres, nécessaires pour relever les défis environnementaux, il est indispensable de passer par une rupture technologique. Des pistes sont à l'étude, telles le recours à des configurations de type open rotor permettant d'atteindre des taux de dilution de l'ordre de 80, l'hybridation électrique ou encore la production de kérosène synthétique.

Le cycle thermodynamique prometteur de Humphrey pourrait détrôner celui qui occupe le devant de la scène depuis près d'un siècle : le cycle de Brayton-Joule. Il a été démontré que le cycle d'Humphrey est nettement plus performant que celui de Brayton. Mais le véritable enjeu est : quelle technologie peut en conserver tous les avantages ?

Le cycle de *Brayton* consiste : 1) à comprimer de l'air extérieur jusqu'à un certain taux (actuellement supérieur à 40) ; 2) le mélanger à du carburant ; 3) l'enflammer de telle sorte qu'il se détende en conservant quasiment la même pression : c'est une combustion à pression constante (CPC) ; 4) pour ensuite le détendre au travers d'une turbine entraînant alors le compresseur haute pression et la soufflante ; 5) l'énergie restante est utilisée pour totalement se détendre au travers d'une tuyère primaire adaptée, et contribue, avec la soufflante, à produire ainsi la poussée recherchée.

Le cycle de *Humphrey* consiste : 1) à comprimer l'air à un taux beaucoup plus faible ; 2) le mélanger à du carburant ; 3) enflammer ce mélange mais cette fois dans une chambre de combustion fermée : c'est une combustion à volume constant (CVC) ; 4) la valve de détente s'ouvre pendant que la valve d'admission reste fermée de façon à produire la poussée recherchée ; puis la valve d'admission s'ouvre pour admettre une nouvelle charge fraîche ; 5) les 2 valves se referment au quasi même instant.

Avantages : le rendement thermodynamique est nettement amélioré et présente des gains en consommation supérieurs à 20%. En configuration mono-flux, il n'y a plus de turbine, car la compression peut être effectuée de façon répartie. En configuration double flux, la CVC peut remplacer le cœur du moteur, le corps haute pression. Subsiste alors la turbine basse pression qui entraîne le module de soufflante. La CVC prend particulièrement tout son sens pour les moteurs de faible poussée où la limite sur la hauteur des derniers aubages du compresseur haute pression empêche d'augmenter le taux de compression. Autre avantage déterminant : si le taux de compression reste proche de 1, avec la CPC, le rendement est quasi nul, alors qu'avec une CVC, le rendement présente tout de même une valeur très significative (30%) comme illustré

LE THERMORÉACTEUR CVC : UNE RÉVOLUTION DANS LE MONDE DE LA PROPULSION ?

sur les courbes du rendement en fonction du taux de compression de la figure 1 (voir aussi Figure 2).

Inconvénient : déterminer la technologie la plus efficace !

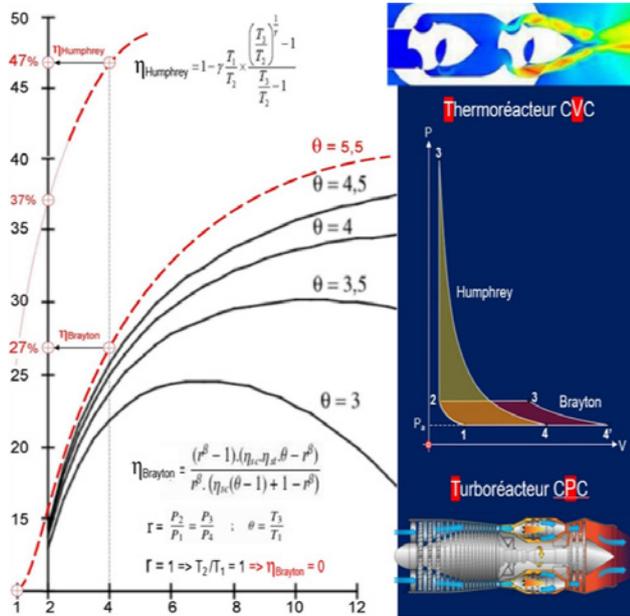


Figure 1. Comparaison des rendements d'un turboréacteur et d'un thermoréacteur

Les centres de recherche et motoristes des États-Unis sont les plus avancés dans le domaine de la CVC, à commencer par la NASA qui, dès les années 70, démontrait l'avantage incontestable de développer une combustion à volume constant versus une combustion à pression constante. Bien entendu, tout repose sur la technologie

mise en œuvre pour conserver de tels avantages. La NASA proposait alors le concept de l'ouverture/fermeture de la chambre de combustion via des flasques dans lesquels étaient ménagées des ouvertures.

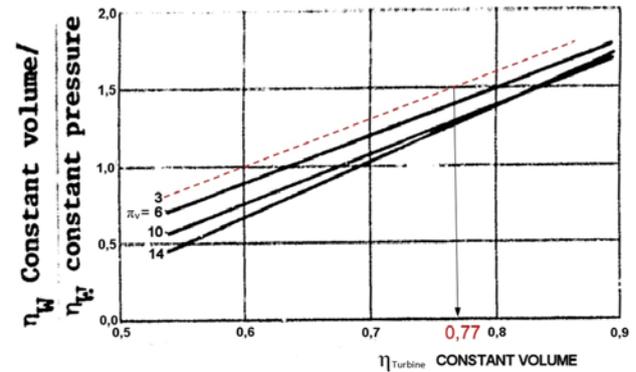
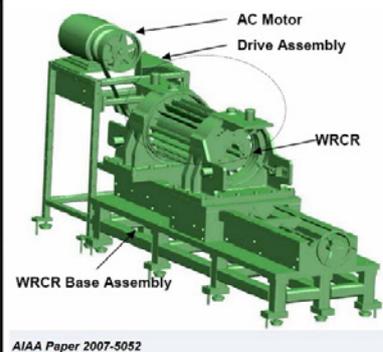
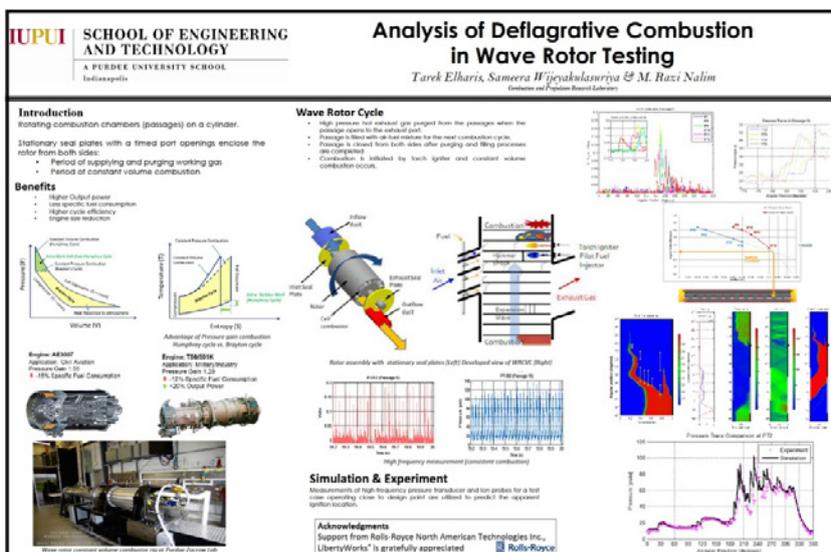


Figure 11. Ratio of economical efficiencies of the constant volume and constant pressure processes as a function of turbine efficiency of the constant volume installation.

1. Report No. NASA TT F-16,618	2. Government Accession No.	3. Recipient's Catalog No.
4. Title and Subtitle THERMODYNAMIC INVESTIGATION OF GAS TURBINES WITH CONTROLLED CONSTANT VOLUME COMBUSTION	5. Report Date October, 1975	6. Performing Organization Code

Figure 2. Efficacités des combustions à pression constante et à volume constant (résultat NASA, 1975)

Il est alors totalement légitime de se demander pourquoi de tels dispositifs ne sont pas appliqués aux turboréacteurs ? Tout d'abord, un turboréacteur doit fonctionner en toute sécurité dans un large domaine de vol et répondre à des exigences réglementaires de certifications venant de l'EASA et de la FAA. Introduire une technologie nouvelle est un processus très long puisqu'il faut démontrer, au travers d'un plan de justification, sa capacité à respecter ces exigences réglementaires.



AIAA Paper 2007-5052

Figure 3. Concept de Wave Rotor (Perdue University School)

LE THERMORÉACTEUR CVC : UNE RÉVOLUTION DANS LE MONDE DE LA PROPULSION ?

En ce qui concerne la technologie de la CVC, la réponse tient dans ces deux constats : 1) l'étanchéité, et 2) la grande différence de vitesse entre le disque d'ouverture/fermeture de la chambre de combustion, et la vitesse d'entraînement du compresseur qui imposait un réducteur dont la masse et la complexité devenaient rédhibitoire.

Cependant, une autre solution CVC a été testée par le motoriste Rolls-Royce en coopération avec une université américaine : le *Wave Rotor* (voir figure 3).

Ce concept a été validé expérimentalement, mais la même question demeure : pourquoi ce dispositif si prometteur n'en est resté qu'au stade universitaire alors que le célèbre motoriste s'y était fortement investi ? On notera aussi que ce brevet date de décembre 1940 ! La réponse est la même : étanchéité entre le barillet en rotation (5000 tr/min) contenant les nombreuses chambres de combustion et les flasques fixes d'injection/éjection aux extrémités. De plus, l'entraînement du barillet imposait d'y associer un moteur électrique, ce qui condamnait de façon irrémédiable une application aéronautique.

Toutes les recherches antérieures relatives aux dispositifs d'ouverture/fermeture de la chambre de combustion lors du dépôt de brevet du thermoréac-

teur conduisait à des mécanismes aux mouvements alternatifs qu'ils soient linéaires (type soupape) ou circulaires (type papillon). De fait, dans un environnement stressant en température et pression, la durée de vie de tels mécanismes s'en trouvait réduite, et sans compter les pertes de charge...

La conclusion de la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency* américaine, équivalent de la DGA) était catégorique (voir figure 4).

En conséquence de quoi, il devenait urgent de concevoir un mécanisme en rotation continue. Ainsi, un premier concept prit forme par le jeu des valves en rotation continue et selon la procédure suivante :

1. éprouver le concept physique sous toutes ses formes (TRL1) ;
2. procéder à sa vérification physico-mathématique afin d'en assurer la conformité aux lois physiques (TRL2) ;
3. passer ensuite aux simulations numériques, car les modèles des phénomènes physiques sont maintenant des plus réalistes, et les coûts engendrés sont de plusieurs ordres inférieurs aux essais (TRL3) ;
4. réaliser enfin des essais et parvenir ainsi au fameux proof of concept (POC) et donc répondre au TRL4. Corriger éventuellement les modèles.

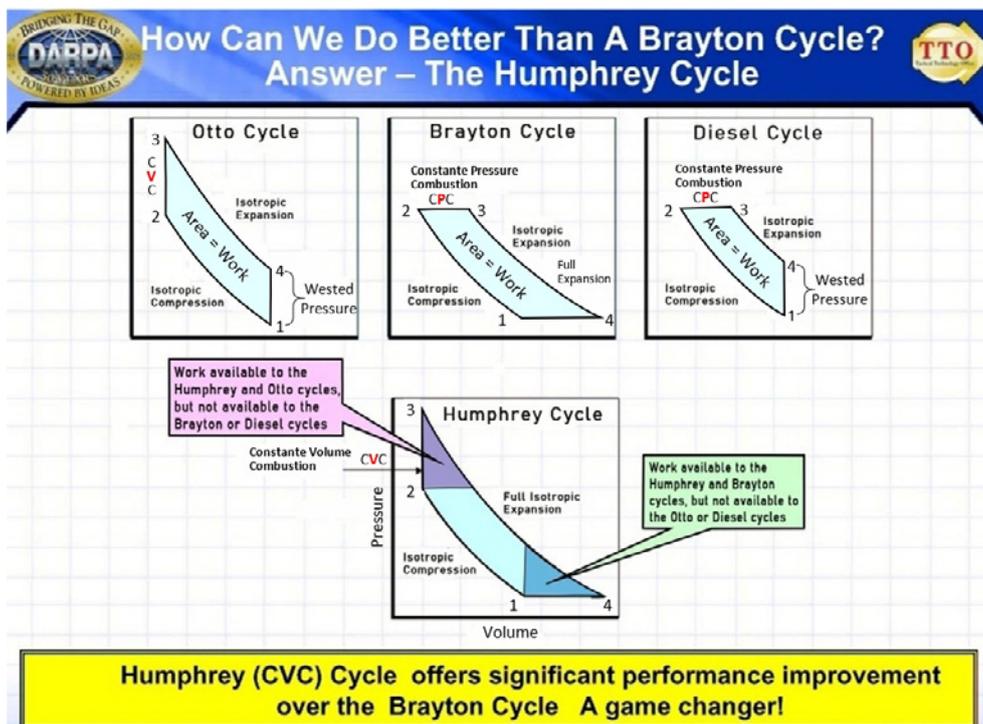


Figure 4. Étude de la DARPA sur les cycles de Brayton et de Humphrey

LE THERMORÉACTEUR CVC : UNE RÉVOLUTION DANS LE MONDE DE LA PROPULSION ?

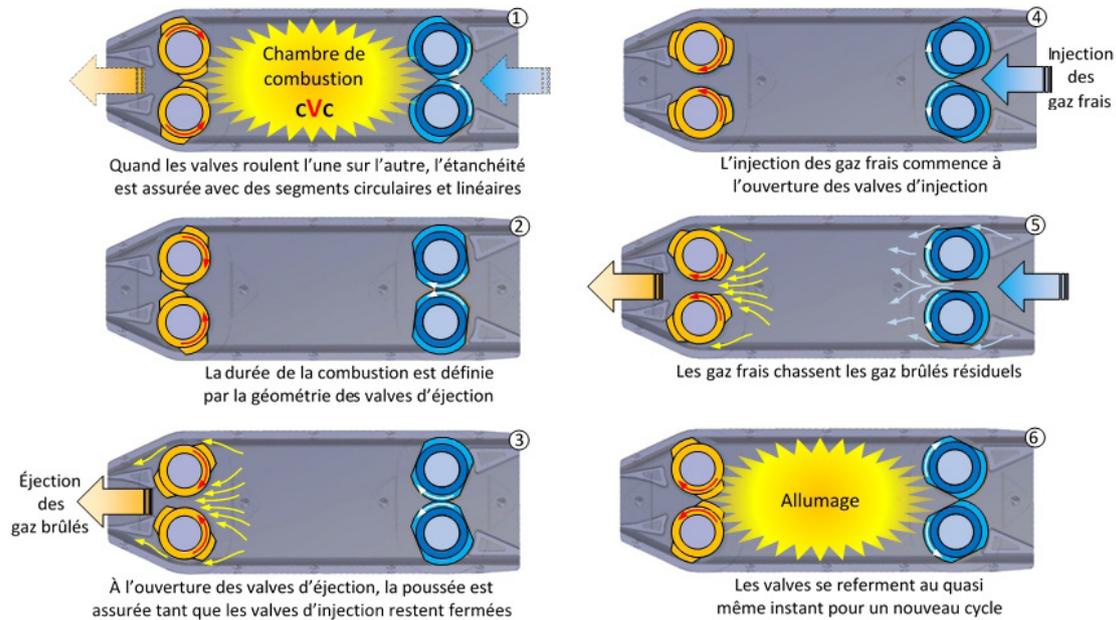


Figure 5. Les valves rotatives de la chambre de combustion à volume constant

Ainsi fait, un premier brevet fut déposé, et qui sera complété par beaucoup d'autres...

La figure 5 illustre le mécanisme de ces valves rotatives qui s'affranchissent de tout mouvement alternatif qu'il soit linéaire ou bien circulaire.

La figure 6 traduit l'évolution du couple pression-poussée fonction du temps, du taux de compression du mélange, de la vitesse de rotation des valves, du volume de la chambre de combustion (3 combustions/tour), et aussi de la richesse du mélange. La poussée moyenne est précisée SANS les différents dispositifs multiplicateurs.

Ce mécanisme peut s'apparenter au ballon que l'on gonfle (montée en pression ou combustion), puis libération de la pression (la valve d'échappement s'ouvre), création de la poussée. Et le cycle de se répéter. Comme tous les concepts, ils sont simples, même si les simulations plaident pour l'étape d'après : les essais. Une équipe fut constituée, mais il restait surtout à trouver le nerf de la guerre : le financement ! Après de multiples rebondissements, un consortium fut créé avec :

- Safran Helicopter Engines qui avait la charge de confirmer, perfectionner de façon numérique la chambre de combustion, et analyser les résultats expérimentaux. La conception / réalisation du prototype fut exécutée en moins de 18 mois par COMAT

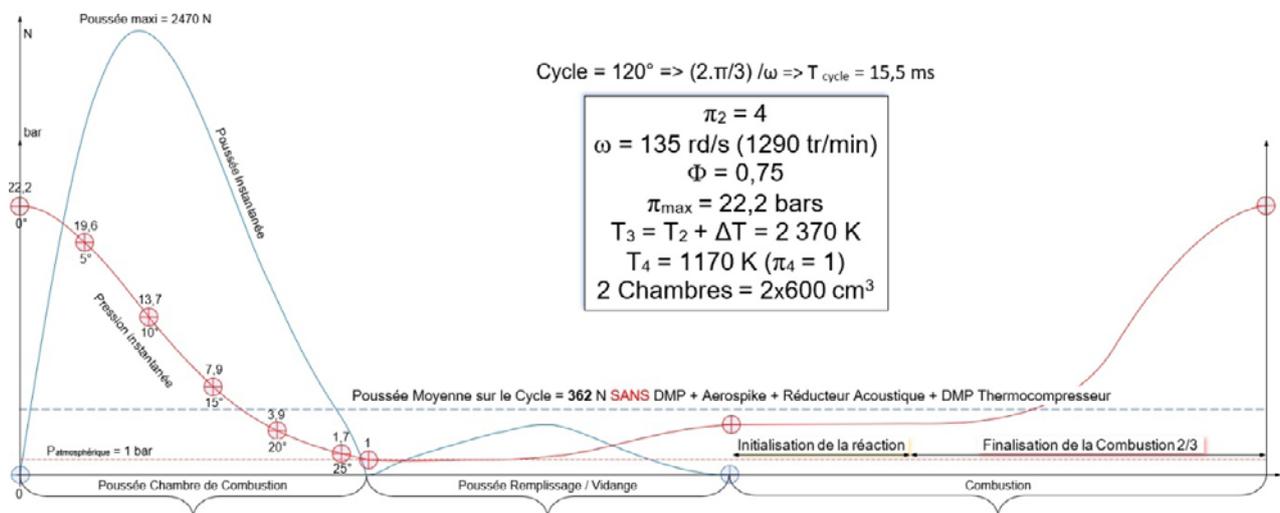


Figure 6. Pression - Poussée

Aerospace à Flourens en banlieue toulousaine.

- Les essais furent menés par l'institut Pprime de Poitiers.
- La DGA accepta ce consortium qui répondait aux critères de son programme RAPID en accordant une subvention de 1,125 million d'euros sur un projet qui s'élevait à 1,5 million d'euros. Les travaux se poursuivirent de janvier 2011 à mars 2014.

La figure 7 présente le prototype du proof of concept où un premier médaillon caractérise une phase de la combustion, et dans le second, les différentes impulsions de pression avec les inévitables dispersions : une combustion ne se répète jamais identiquement à elle-même, attendu que les turbulences sont, par nature, tridimensionnelles, et de type aléatoire. D'où les prouesses de toutes les équipes numériques qui œuvrent dans la combustion (CERFACS) en s'attaquant à cette très grande difficulté. Mais une fois les modèles éprouvés, alors les durées de combustion peuvent être estimées ainsi que la température et donc la pression. Ce prototype représentait la 2e génération (TR2G) du thermoréacteur.

Ainsi, fort de toutes les mises en relief des différents points durs, des améliorations notables ont pu être apportées comme :

L'étanchéité : le bi valve par ses jeux mécaniques présentait 3 zones de fuites potentielles, un double mécanisme pour l'entraînement des valves, une masse plus importante, des moteurs d'entraînement des valves,

et un calage plus délicat. Le passage à un mono valve avec ses segments linéaires et circulaires était indispensable (Brevet déposé en juin 2012).

L'allumage : après un premier allumage (effet joule type bougie glow), les suivants devaient se faire de façon plus efficace d'autant que l'allumage électrique présente une masse importante : bougie + bobine + connections + carte de commande + batterie. La solution retenue fut celle de l'allumage thermique type Wave Rotor, préférée au dispositif de la préchambre d'allumage.

Le bruit : il devenait urgent de trouver une solution au bruit caractéristique généré par la combustion pulsée. Un concept de réduction acoustique fut validé grâce aux modèles numériques très sophistiqués développés par la société Sogeti High Tech de Toulouse/Blagnac (groupe Cap Gemini) et sous-traitant de rang 1 d'Airbus, notamment pour l'acoustique. La réduction du bruit dans certaines plages (voir figure 8) était dans un rapport de 1 à 30 en termes de puissance acoustique ! Le financement fut assuré par Airbus Innovation (ex EADS Innovation Works).

La poussée augmentée : dans les années 2000, la NASA valida expérimentalement le Thrust Augmentor (voir figure 9) qui consistait à placer un éjecteur en prolongement de la tuyère d'un turbo réacteur afin de multiplier de façon très significative la poussée totale, sans augmenter la consommation ! Seul inconvénient pour lequel nous ne voyons toujours pas d'application : compte tenu de sa

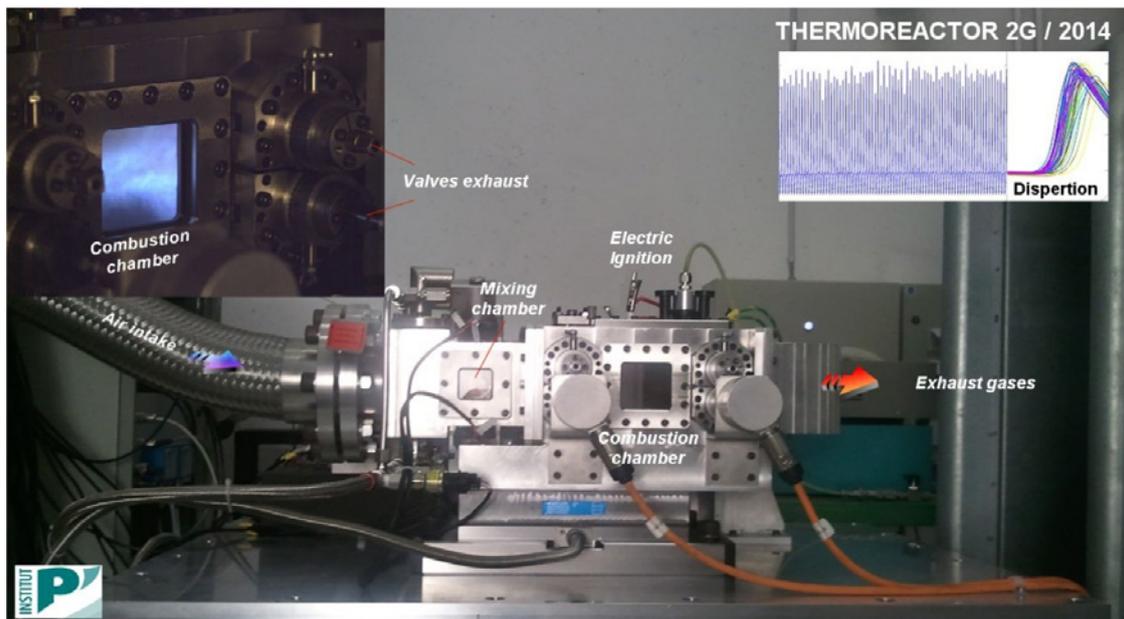


Figure 7. Test du prototype de la chambre de combustion à l'institut Pprime

LE THERMORÉACTEUR CVC : UNE RÉVOLUTION DANS LE MONDE DE LA PROPULSION ?

section circulaire, ce dispositif fixe n'est acceptable qu'à de très faibles vitesses (décollage) pour cause de traînée rédhibitoire en vitesse de croisière.

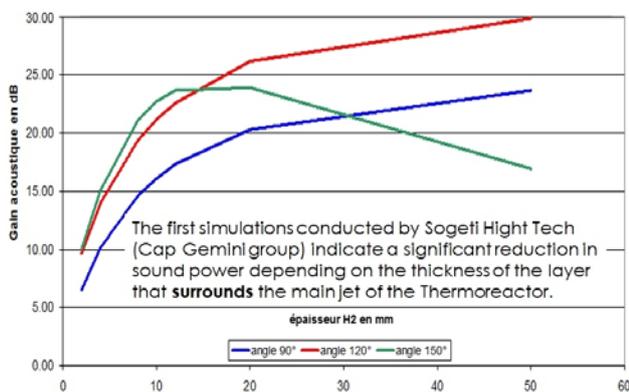


Figure 8. Réducteur acoustique



Figure 9. Dispositif Thrust Augmentor testé par la NASA sur le Gulfstream G-III

La propulsion aérodynamique : l'effet Chilowsky découvert au début du 20^e siècle par Constantin Chilowsky a été appliqué aux obus français lors de la Première Guerre mondiale. Cet effet physique réduit fortement la traînée aérodynamique et peut même, par abus de langage, produire une traînée « négative » et donc de la poussée ! Toutes les simulations numériques menées pour le vérifier montrent l'efficacité de cet effet. Et selon une architecture optimisée, la consommation de l'aéronef s'en trouvera fortement diminuée.

L'hydrogène : pour lutter contre la production de NOx lors de la combustion, en accord avec les expérimentations menées par la NASA, une faible proportion d'hydrogène gazeux sera introduite dans la charge fraîche, ce qui contribuera aussi à faciliter l'allumage thermique.

L'échangeur : afin de réduire la consommation de carburant, le circuit d'air comprimé sera guidé de sorte à participer au « refroidissement » de la chambre de combustion. Ce faisant, sa température à l'entrée de la chambre de combustion en sera augmentée - l'objectif de toute chambre de combustion étant d'augmenter la température (et donc la pression) des gaz qui y sont

injectés -, ce qui permettra de réduire la quantité de carburant. Ainsi, pour une même température de fin de combustion, augmenter de 20% la température de cet air comprimé, c'est réduire de quasiment 5% la quantité de carburant de la charge fraîche.

Le brouillage : pour une application militaire, où le brouillage des systèmes électroniques et informatiques reste préoccupant, une solution mécanique fut préférée qui, sans présenter la même souplesse d'adaptation instantanée, permet néanmoins, après optimisation de la performance recherchée, de gagner en robustesse et surtout de rester insensible aux brouillages électromagnétiques.

Après ces améliorations, le thermoréacteur dont les plans ont été exécutés sur le logiciel de CAO Catia V5 de Dassault Systèmes, peut se présenter sous la forme éclatée de la figure 10, en remarquant qu'en raison de sa faible épaisseur, ce propulseur peut se loger directement dans les ailes ou tout autre partie du fuselage.

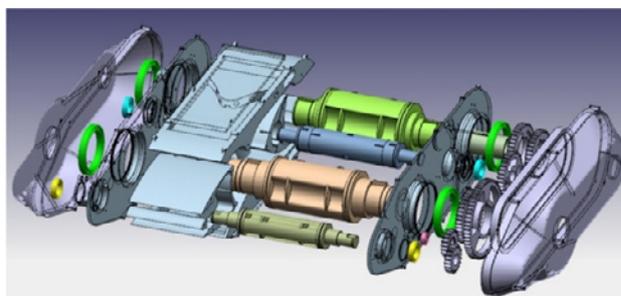


Figure 10. Vue éclatée du thermoréacteur

En 2021 le thermoréacteur en est à sa 11^e génération. La figure 11 est représentative d'une application pour modèle réduit. Le compresseur Wankel qui offre de multiples avantages compte tenu du faible taux de compression et donc de température (compresseur en composite ou en thermoplastique, et selon la technologie de la fabrication additive) est entraîné par la valve d'échappement réputée motrice. Il est même possible que ce propulseur pour modèle réduit fonctionne sans compresseur comme les pulsoréacteurs actuels du commerce.

Le DMP (Dispositif multiplicateur de poussée) breveté en 2020 sous le numéro FR1771196 est en totale compatibilité avec le brevet du thermoréacteur de 2012 (voir figure 12). La faible épaisseur de ce module propulsif permet de l'intégrer directement dans les ailes.

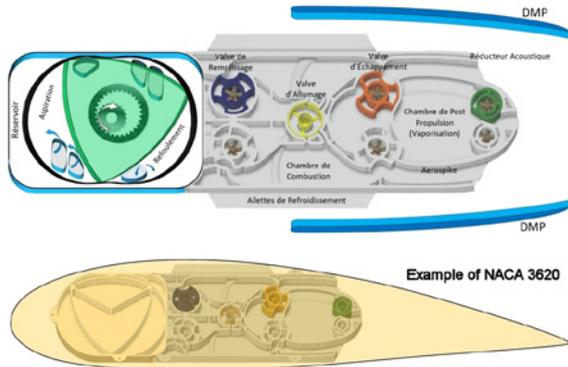


Figure 11. Thermoréacteur pour modèle réduit

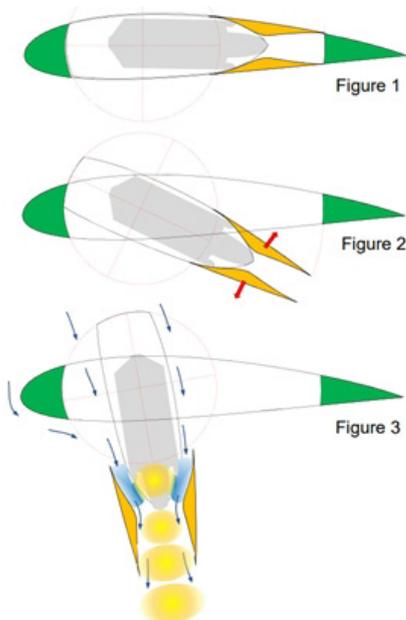


Figure 12. Dispositif multiplicateur de poussée (figures extraites du Brevet DMP)

Si le thermoréacteur est une « brique » essentielle en tant que système propulsif, nombreuses sont ses autres applications. Ainsi, dans le prolongement de son ADN Propulsif un groupe d'étudiants de l'IPSA (Institut polytechnique des sciences avancées) s'est investi pour adapter le thermoréacteur à la propulsion spatiale par plasma pulsé (voir figure 13) dont les produits de la combustion seront accélérés à une vitesse proche des 100 km/s.

Après ses applications relatives à la propulsion terrestre (route, rail), maritime (Ekranoplane), aérienne ou spatiale, une transformation de son énergie cinétique en énergie mécanique a pour objectif de produire de l'énergie (voir figure 14) : la thermoturbine. Cette dernière permet la production d'énergie électrique et thermique (chauffage) : la cogénération, voire même

la tri-génération avec la production d'air comprimé, un marché très important pour l'industrie en général. La génératrice est entraînée par l'arbre du stato-rotor à faible vitesse de rotation, et un échangeur thermique (non représenté) réchauffe de l'eau destinée au chauffage des bâtiments publics, particuliers ou industriels. Les puissances électriques produites seront comprises entre 10 et 1000 kW.

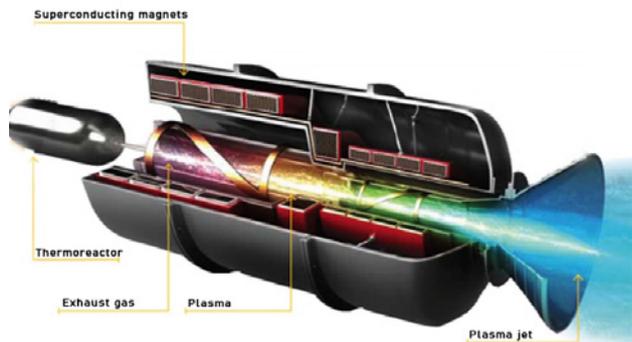


Figure 13. Propulsion Thermo-Plasmique

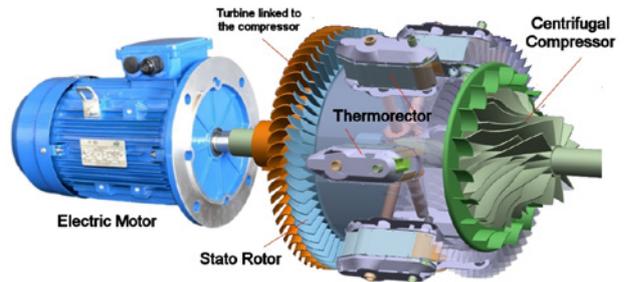


Figure 14. Architecture de la Thermoturbine

Un objectif à court terme est de présenter au salon du Bourget de 202X un drone de démonstration qui cumulerait toutes ces innovations. La figure 15 expose une version de ce prototype monoplace en mode décollage vertical (VTOL), à base de thermoréacteur (option Ekranoplane) et à propulsion Chilowsky.

Dans sa version militaire cet aéronef pourra accueillir de 0 à 4 places (« 0 » en version drone autonome avec une charge utile de 300 kg), autonomie : 800 km, vitesse de croisière : 200 km/h, altitude plafond (sans air conditionné) : 3800 m, vitesse maxi : 700 km/h pendant 2 minutes sous la couverture radar.

Une « dernière » opération aérodynamique effectuée par le CEMES (Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales, de Sophia Antipolis), a permis d'utiliser la soufflerie numérique pour valider les propriétés aérodynamiques de cette aérostructure type Ekranoplane (voir figure 16) :

LE THERMORÉACTEUR CVC : UNE RÉVOLUTION DANS LE MONDE DE LA PROPULSION ?

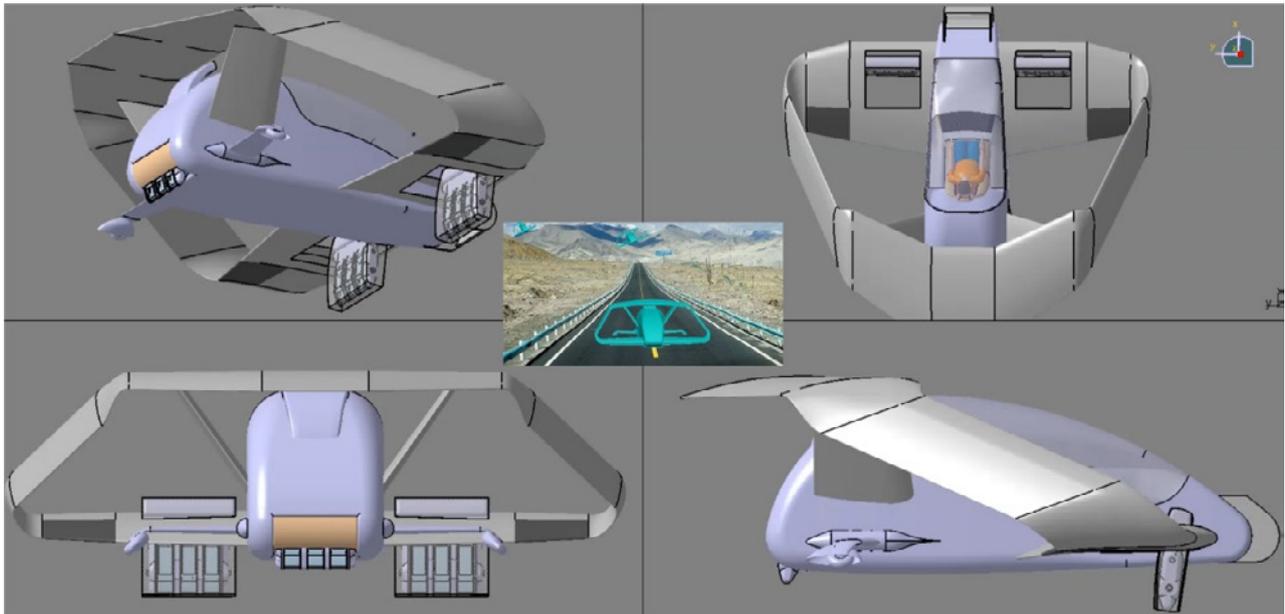


Figure 15. Projet de drone de démonstration à base de thermoréacteur

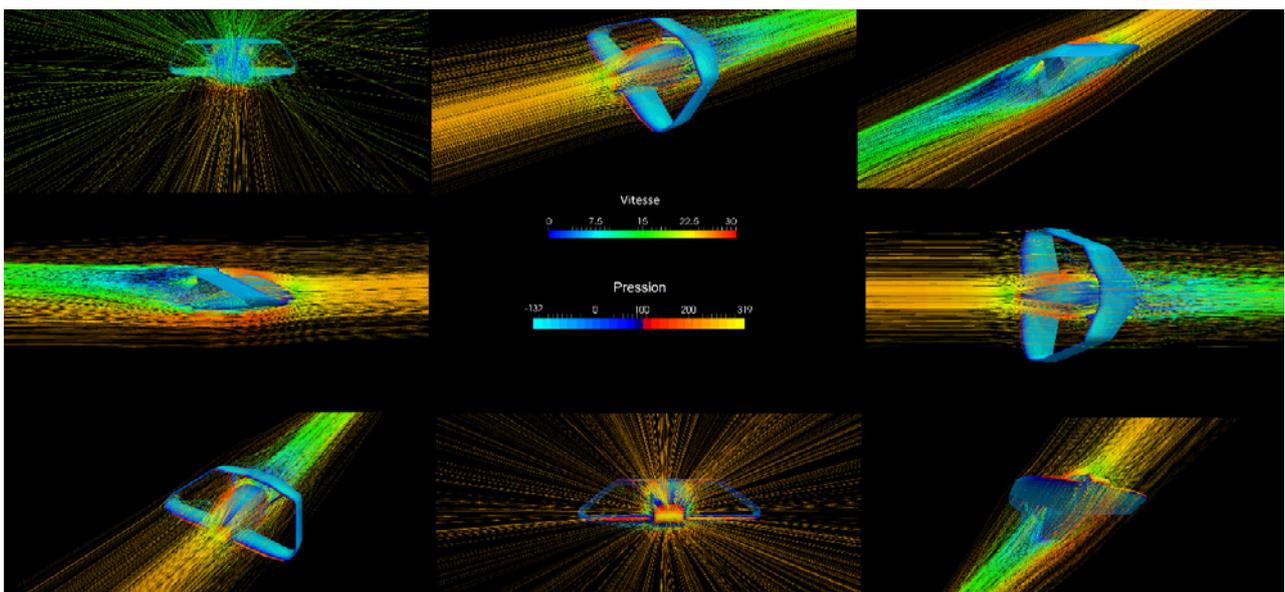


Figure 16. Premiers essais en soufflerie numérique au CEMEF/Mines ParisTech de Sophia Antipolis

En conclusion, la combustion à volume constant est une piste crédible pour améliorer le rendement thermique des systèmes de propulsion. Les premières analyses par le calcul et les premiers résultats des travaux expérimentaux en laboratoire sont encourageants. La prochaine étape est la réalisation d'un véhicule de démonstration. La France dispose de l'ensemble des compétences scientifiques et industrielles pour mener à bien ce type de démonstration.

FILMOGRAPHIE :

Le film des essais sol effectués en 1917 par Constantin Chilowsky est disponible à l'adresse suivante : <http://videotheque.cnrs.fr/doc=4277> ■

MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE ET AÉRODYNAMIQUE OPTIMISÉE

par Benjamin Deveaux, ingénieur aérodynamicien chez Avions Mauboussin

La marque mythique d'Avions Mauboussin a été relancée par David Gallezot qui a fondé l'entreprise en 2011. Celle-ci est implantée à Belfort depuis 2017 avec une équipe d'une dizaine de personnes. L'objectif est de permettre une mobilité aérienne interurbaine responsable. En d'autres termes, on souhaite relier directement le cœur des villes avec une solution de transport aérien rejetant peu de CO₂. Afin d'illustrer l'intérêt de cette mobilité interurbaine, considérons par exemple le trajet entre Paris la Défense et Canary Wharf à Londres. Le trajet par avion de ligne ou par Eurostar dure environ 3h30, porte à porte. Avec un avion pouvant décoller de l'héliport d'Issy-les-Moulineaux et atterrir à London City, le trajet porte à porte ne dure plus que 1h30. Puisque la piste d'Issy-les-Moulineaux ne fait que 300m de long, l'avion doit posséder la capacité de décoller et atterrir court (STOL en anglais). Ensuite, la réduction des émissions de CO₂ des Avions Mauboussin passe par le développement d'un système de propulsion hybride électrique – thermique innovant, projet baptisé Zéphyr. Le moteur thermique, dans un premier temps alimenté en carburant conventionnel, fonctionnera à terme avec de l'hydrogène. Enfin, la structure sera réalisée en composites naturels avec du bois et des fibres issues de filières responsables.

Le premier modèle d'Avions Mauboussin sera un avion léger biplace en tandem : *Alérion M1h*. Le second sera un avion multimoteur régional hybride de 6 places : *Alcyon M3c*. Le premier vol d'*Alérion* est prévu en 2023 et celui d'*Alcyon* en 2024. La conception d'*Alcyon* s'appuiera sur les briques technologiques développées pour *Alérion*.

Parmi ces briques technologiques, l'aérodynamique d'*Alérion* devra lui permettre de décoller et atterrir court tout en ayant un large rayon d'action. Cela demande donc d'avoir une aile générant un coefficient de portance élevé pendant les phases de décollage et atterrissage tout en ayant un coefficient de traînée minimal durant le vol de croisière. Pour atteindre ces objectifs, un travail d'optimisation du profil d'aile a été réalisé, ce qui est schématisé dans l'encadré. Le résultat est un profil à géométrie variable disposant d'un bec de bord d'attaque et d'un volet double fente. La philosophie de la conception d'*Alérion* étant « simplicité et efficacité », une attention particulière a été portée à la simplification de la géométrie du profil et de la cinématique des éléments mobiles.

Une campagne d'essai réalisée au Laboratoire Aérodynamique Eiffel a permis de caractériser expérimentalement ce profil optimisé. Ces essais ont également permis



Alcyon M3c. un avion multimoteur régional hybride de 6 places

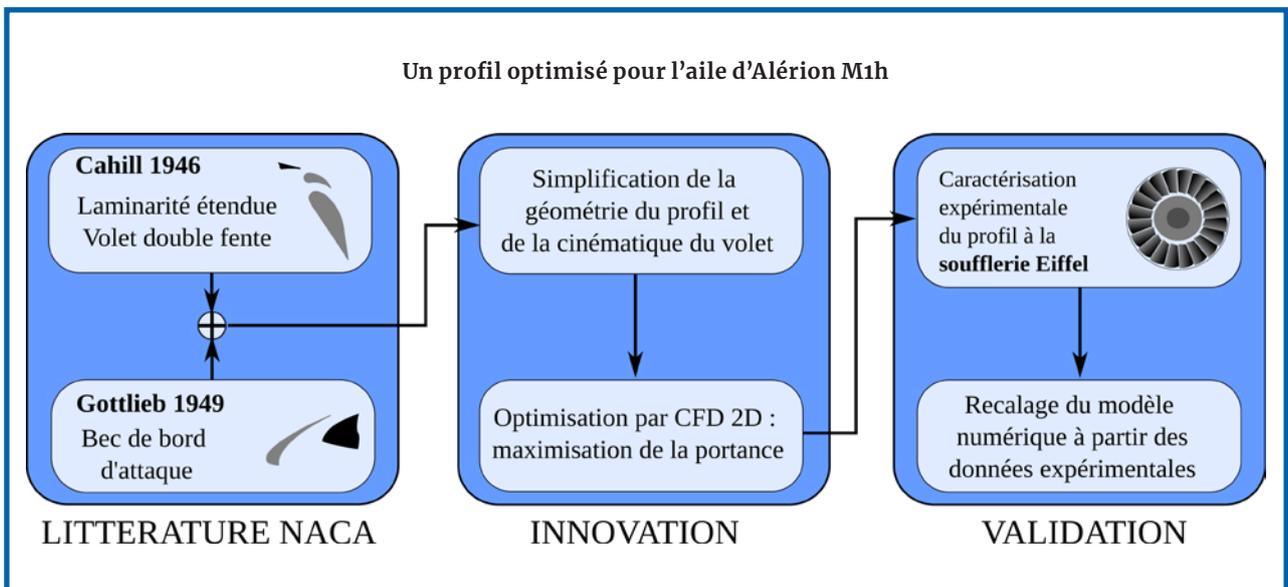


Alérion M1h, un avion léger biplace en tandem

d'évaluer la faisabilité de plusieurs solutions techniques. Des visualisations par fils de laine et des sondages dans le sillage ont été réalisés en complément des mesures d'efforts. Ces données expérimentales permettent d'une part d'analyser finement l'écoulement autour du profil, et servent d'autre part de référence pour valider les simulations numériques. La combinaison de l'approche expérimentale et numérique offre donc une caractérisation exhaustive de ce profil d'aile, posant ainsi des bases solides pour la suite du dimensionnement d'Alérion. ■



Profil d'aile d'Alérion M1h dans la soufflerie Eiffel



LA MÉCANIQUE DES FLUIDES NUMÉRIQUE DANS LES ANNÉES 2020

par Philippe Spalart, Boeing Senior Technical Fellow retraité, membre de la Commission Aérodynamique de la 3AF



Après l'École polytechnique, Philippe Spalart obtint un PhD en Aérospatial à Stanford/NASA-Ames en 1982. Arrivé chez Boeing en 1990, il créa le modèle de turbulence de Spalart-Allmaras de type Reynolds-Averaged Navier-Stokes, à équation unique. En 1997 il proposa l'approche Detached-Eddy Simulation pour calculer les écoulements décollés à grand nombre de Reynolds. Devenu Boeing Senior Technical Fellow en 2007, il est admis à la National Academy of Engineering en 2017, et reçut le Reed Award de l'AIAA en 2019. Ses travaux récents ont porté sur l'aéroacoustique numérique, des théories en aérodynamique et en turbulence, et la conception d'expériences. Ses publications ont fait l'objet de 38 000 citations dans la littérature scientifique. Philippe Spalart est membre de la Commission technique aérodynamique depuis 2015.

La mécanique des fluides numérique (MFN) jouera un rôle croissant dans la science et l'industrie au cours des décennies à venir. On tente ici de décrire de façon accessible et visuelle mais bien étayée les espoirs et les défis qui se dessinent assez clairement pour les quelques années qui viennent. Ceux-ci sont très similaires pour les industries aéronautiques, de transport terrestre et maritime, éolienne, de climatisation, et même le combat contre la Covid-19. Les grands défis sont de deux natures. Le premier est d'ordre numérique, quand on vise des niveaux d'erreur négligeables dans les solutions numériques et un processus lisse et reproductible sans expertise extrême de la part de l'utilisateur et sans un coût de calcul excessif. Ici, on constate d'excellents progrès mathématiques en particulier pour la discrétisation et l'adaptation de maillage. Par ailleurs, l'augmentation continue de la puissance des calculateurs est favorable. Pour les écoulements stationnaires et même en géométrie complexe, on est proche de la convergence en maillage du moins pour les calculs de démonstration. Le second type de défis est physique, et concerne la modélisation de la turbulence. Là, on doit reconnaître une certaine stagnation pour le développement des modèles de turbulence classiques, contre une foison de propositions concurrentes pour les simulations qui représentent du moins en partie le champ turbulent comme tridimensionnel et instationnaire. Ces questions, qui soulèvent des difficultés théoriques profondes, n'auront pas de réponse décisive avant 2030, voire beaucoup plus tard.

ÉTAT GÉNÉRAL

L'un de plus beaux compliments faits à la MFN est que, pour chaque équipe de Formule 1, le temps de calcul annuel est limité par la Fédération internationale de l'automobile, tout comme le sont les essais en soufflerie. La figure 1 montre sur une monoplace les régions chargées de rotationnel, et donc de cisaillement (sur le corps de la voiture), ou de tourbillon (derrière la roue). Le calcul turbulent est du type *Detached Eddy Simulation* (DES, sur lequel on reviendra) ; ne trouvant pas de traduction commune on a laissé un bon nombre d'appellations et d'acronymes en anglais. La figure 1 illustre beaucoup de thèmes de l'article.

La complexité de la géométrie est impressionnante (ceci est une Formule 2, et la Formule 1 est pire encore). On sait aussi que les conduites de refroidissement des freins sont assez petites, mais sont importantes vus les écarts très faibles de performance. Cependant la convergence numérique est loin d'être atteinte ; pour « être à l'aise » ici ou en aéronautique il faudrait bien plus qu'un ordre de grandeur d'augmentation de la puissance de calcul. Le calcul, fait par Totalsim au Royaume-Uni, est très réaliste : en particulier, les roues tournent y compris les rayons, la piste défile, et les pneus sont représentés comme parois rugueuses mais le reste comme parois lisses. Les radiateurs sont des parois poreuses. Les couches limites sont traitées par modélisation classique de la turbulence (équations *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, ou RANS) quasi-stationnaire. Le sillage de la roue en revanche est traité par simulation tridimensionnelle et instationnaire pour les plus gros tourbillons et modélisation pour les plus petits (*Large Eddy Simulation*, ou LES). Cette technique

hybride RANS-LES a une logique physique forte et est très prometteuse, mais de sérieuses questions théoriques et pratiques demeurent. On voit donc, dans cette industrie et dans les autres, un grand besoin à la fois d'algorithmes plus précis, de plus grande puissance de calcul, et de clarté et de contrôle du point de vue de la turbulence. La MFN est donc très utile, mais elle demande de la part de l'utilisateur une bonne part de jugement.

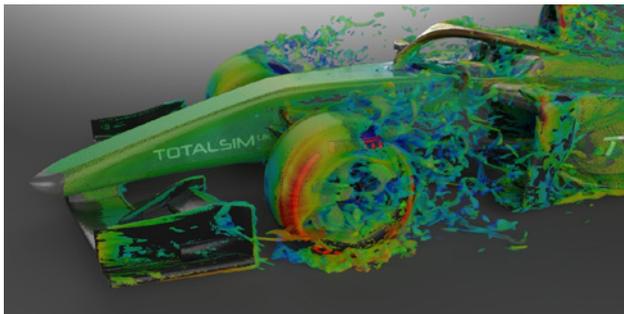


Figure 1. Surfaces de rotationnel constant, colorées par la vitesse. Avec la permission de J. Paton de Totalsim.

De grands mouvements sont en cours, à commencer par le logiciel. Les codes de calcul sont fournis par les gouvernements, par l'industrie pour les besoins de l'entreprise, par les universités, ou par des fournisseurs commerciaux. Il y a des fournisseurs très établis, massifs et globaux, de même que des « startups » qui espèrent envahir le domaine. Traditionnellement, les codes ont été confidentiels, pour des raisons nationales ou commerciales. Il y a maintenant un mouvement vers l'« Open Source » : le code est public, et pour certains les utilisateurs contribuent à son développement. Les motifs commerciaux peuvent avoir des effets pervers, par rapport à la science « pure » des acteurs académiques et de gouvernement. En 2017 la compagnie EXA, qui n'est même pas l'une des principales, s'est vendue pour environ 400 millions de dollars. La tendance à enjoliver les résultats est alors forte dans certains cas. A quand la première « licorne » ?

Les codes de MFN sont progressivement couplés à des codes de calcul des structures. La flexibilité est très visible pour les ailes composites comme celle du Boeing 787 d'où la nécessité de ce couplage, qui constitue de plus un avantage de taille par rapport aux essais en soufflerie ; le gauchissement de l'aile est considérable, surtout aux forts facteurs de charge (pensez à 2,5 g). On voit moins les flexions statiques et dynamiques des supports-moteurs ou des montures des hypersustentateurs, mais elles sont aussi cruciales. Le tremblement est un problème de base et menaçant en aéronautique, et la MFN progresse bien.

Pour la turbulence, l'éventail entier depuis la méthode RANS stationnaire jusqu'à la LES pure est en concurrence. Dans certains cas, même si la modélisation stationnaire donnait des quantités moyennes précises, on a besoin de champs instationnaires, pour les vibrations et le bruit. La propagation du son depuis la région turbulente jusqu'aux grandes distances est un beau défi. La plupart des codes partent des équations de Navier-Stokes, mais certains partent des équations Lattice Boltzmann, surtout dans l'automobile. L'approche *Lattice Boltzmann Method* (LBM) est très commode, mais la physique est discutable surtout dans les couches limites, sans compter les limitations en transsonique.

Les efforts sur les moyens de calcul au sommet sont intenses, aussi bien en Occident qu'en Chine et au Japon. La Loi de Moore s'est essoufflée dans les années 2010 pour les puces classiques ou CPU (*Central Processing Units*) ce qui a conduit à de très grands nombres de cœurs et des consommations électriques très élevées. On voit aussi que le coût des communications dépasse le coût des opérations arithmétiques (à la limite, « *flops are free* »). Les *Graphics Processing Units* ou GPU donnent des accélérations remarquables, encore que les codes doivent être adaptés, souvent aux dépens de la vraie vitesse du code, par exemple et imposant un pas de temps trop court. Les avis restent donc partagés. Certains codes ont été réécrits en profondeur, et les codes entièrement nouveaux ont des chances dans leur rivalité avec les codes bien établis, dont certains depuis les années 80. Les GPU viennent de l'industrie du cinéma, mais la demande en calcul scientifique pourrait orienter les nouveaux modèles.

Il est entendu que les machines les plus puissantes ne tournent en pratique qu'à quelques pourcents de leur vitesse théorique, ou même de leur vitesse sur le logiciel LINPACK. Donc, si en 2021 on a en principe presque 10^{18} opérations par seconde (l'exaflop), en fait les calculs de tous les jours sont plus proches de 10^{16} . En général, on ne connaît même pas le vrai taux de calcul. Un autre danger est que la génération du maillage, en particulier, finisse par dominer le temps calcul au lieu que ce soit la solution des équations différentielles. Ceci à cause de logiques complexes et des grandes différences de démarches pour chaque génération, d'un maillage à l'autre. La préparation en partant du fichier *Computer Aided Design* (CAD) et l'exploitation graphique des champs calculés deviennent aussi des goulots d'étranglement. Au-delà des GPU, les ordinateurs quantiques devraient se dessiner, mais leur effet sur la MFN est encore nul en 2021.

Après cet aperçu des questions que l'auteur ne connaît qu'en surface, on passe aux aspects plus techniques et quantitatifs, d'abord numériques, et ensuite à ceux de la turbulence. Il est facile de montrer qu'il y a eu du progrès, mais bien plus difficile de décider si la situation est devenue satisfaisante de sorte que l'on peut reporter l'effort mondial sur d'autres aspects de la MFN, ou si au contraire il y a un écueil de taille, qui demandera des années ou des décennies à éliminer.

GÉNÉRATION DE MAILLAGES ET OUTILS ASSOCIÉS

Pour ce sujet, on utilisera le calcul autour d'un avion de ligne dont les hypersustentateurs sont déployés. C'est le sujet d'un travail communautaire intense, et ceci pour de bonnes raisons économiques surtout en Europe et aux États-Unis. Les dépenses de temps et d'argent de l'industrie dans les souffleries sont très élevées, et de plus, on a encore des surprises rares mais très coûteuses au moment des essais en vol, que l'auteur ne pourra pas décrire. Le problème de l'avion est aussi assez similaire à ceux du transport terrestre.

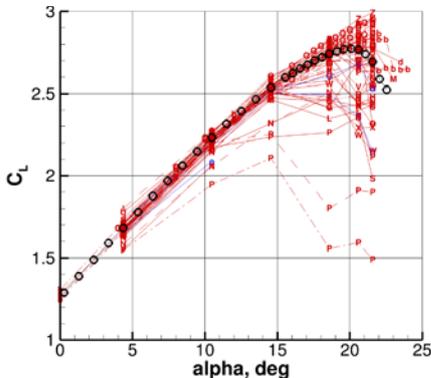


Figure 2. Portance en fonction de l'incidence du JAXA Standard Model, en position d'atterrissage. High-Lift Prediction Workshop III.

La figure 2 montre les résultats d'un « workshop » pour la portance du modèle JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), où plusieurs faiblesses sont évidentes. La figure montre les résultats en soufflerie, et de nombreux calculs, presque tous en mode RANS. Aux faibles incidences, presque tous les résultats sont en bon accord avec les essais. Aux incidences élevées, les résultats se dispersent énormément. De plus, presque tous les codes admettent au moins deux solutions à la même incidence, et la solution ayant une portance faible est en général considérée comme « erronée » sans toutefois avoir de preuve rigoureuse. Aucun des participants n'était en

mesure de démontrer la convergence de ses calculs en termes de densité de maillage. Presque tous les maillages étaient construits « à la main » en concentrant les points dans les régions considérées comme exigeantes, ce qui prend des semaines de travail et une très grande expertise. Il est clair que cet outil n'est pas prêt pour une utilisation industrielle systématique, mais Boeing comme Airbus investissent beaucoup dedans, et des progrès importants sont en cours avec des maillages commerciaux, en particulier.

En même temps, on remarque qu'il n'y a qu'un essai en soufflerie, et l'on ne sait pas précisément ce qu'un autre essai donnerait, surtout aux incidences élevées. La prochaine campagne similaire, sur le *High-Lift Common Research Model*, bénéficiera d'essais dans plusieurs souffleries, à l'échelle mondiale. Les résultats des essais préliminaires révèlent des déviations très appréciables. On aura donc une « bande » de courbes, et la MFN tentera au moins de tomber dans cette bande. Rien n'est garanti, en particulier pour le type de décrochage : graduel comme pour les essais de la figure 2, ou brutal comme souvent dans la MFN (avec le danger de sauter d'une branche à l'autre). On peut soupçonner un défaut congénital de la modélisation RANS stationnaire (y compris avec le modèle de Spalart et Allmaras) ; nous y reviendrons.

Passons à des progrès assez récents, venant d'un travail en profondeur, en particulier en France et aux États-Unis. Les maillages de la figure 3 sont adaptatifs. Le code engendre, un à un, des maillages qui placent de plus en plus les points dans les régions de besoin. Sur la paroi, on voit bien les points se concentrer aux endroits de forte courbure, et aussi dans les sillages du train avant et de l'aile. Dans un écoulement transsonique ou supersonique comme dans les deux graphes du bas, les ondes de choc et les ondes de Mach (associées à des imperfections du profil) ressortent, de même que l'anisotropie prononcée des maillages qui est bien sur très avantageuse. La figure du haut à droite montre de façon spectaculaire les tourbillons et les sillages, et celle du bas à droite le sillage turbulent.

La figure illustre aussi le caractère non-structuré des maillages, avec des cellules tétraédriques ou autres, en contraste avec les maillages traditionnels structurés « en (i,j,k) ». L'adaptatif se marie très bien avec ce type de code très puissant. De même, les codes classiques sont presque, tous en volumes finis du second ordre de précision, mais les nouveaux codes sont souvent d'ordre plus élevé.

Pour les nouveaux codes d'ordre élevé, on peut s'attendre à un changement de paradigme assez fondamental, dans la mesure où l'utilisateur pourra contrôler la précision de son calcul, *sur un même maillage*, en augmentant simplement l'ordre de précision, sans limites théoriques. A cela on peut ajouter le potentiel de l'adaptation en ordre (p -adaptation), toujours sur le même maillage initial. Ce qui simplifiera considérablement la tâche des utilisateurs de ces codes.

Au moins deux principes d'adaptation sont en cours, pour les codes volumes finis. L'adaptation « feature-based » si l'on simplifie à l'extrême va ajouter des points dans une maille si, par exemple, les écarts de nombre de Mach dépassent un seuil. L'adaptation « output-based » est bien plus élaborée et ajoute des points si cela améliorera la précision de la traînée, qui résulte du champ entier, par exemple. Ceci passe par l'« opérateur adjoint ». On peut optimiser pour la portance au lieu de la traînée, etc. Dans les deux cas, un grand travail a été consacré à lisser le maillage après la subdivision « brutale ». Une autre capacité importante est celle de « dé-raffiner » le maillage : si, au fur et à mesure de l'adaptation, l'onde de choc se déplaçant, on désire repasser à une distribution plus grossière à l'ancien emplacement du choc. Mais ceci reste très compliqué à mettre en œuvre.

Les codes modernes font la promesse d'une précision bien supérieure pour un nombre de points donné, tout en demandant plus d'opérations par point. Mais ils doivent aussi diminuer fortement l'expertise et le travail rebutant

demandés à l'utilisateur, et aussi améliorer la répétabilité des résultats, qui est très importante dans une industrie qui demande tant de fiabilité. En simplifiant, « il suffit de fournir un bon fichier de la géométrie, et de déclarer quelle est la précision nécessaire ». On s'approche de la situation où le système numérique donne une borne supérieure de l'erreur numérique, par exemple 3% sur la traînée. Bien entendu, des bornes trop lâches ne sont pas très utiles.

Pour résumer de façon simpliste, les années 2020 devraient permettre la disparition, en pratique, des erreurs numériques et des maladresses humaines en représentation RANS stationnaire.

Le même état pour les représentations instationnaires viendra plus tard, aussi bien pour des raisons théoriques que des raisons informatiques et de temps de calcul. Il y a aussi un large fossé entre la capacité à réussir un « grand calcul » et la capacité à effectuer de façon économique les milliers de calculs nécessaires pour l'optimisation d'un nouveau modèle d'avion, et ensuite sa certification.

TRAITEMENT DE LA TURBULENCE

On constate malheureusement un accord diffus sur l'idée que la « solution du problème de la turbulence » est bien plus lointaine que celle du problème numérique (du moins stationnaire), et l'auteur a même écrit qu'une vraie solution ne viendrait pas au 21^{ème} siècle. Les opinions pessimistes de l'auteur ne sont pas vraiment acceptées

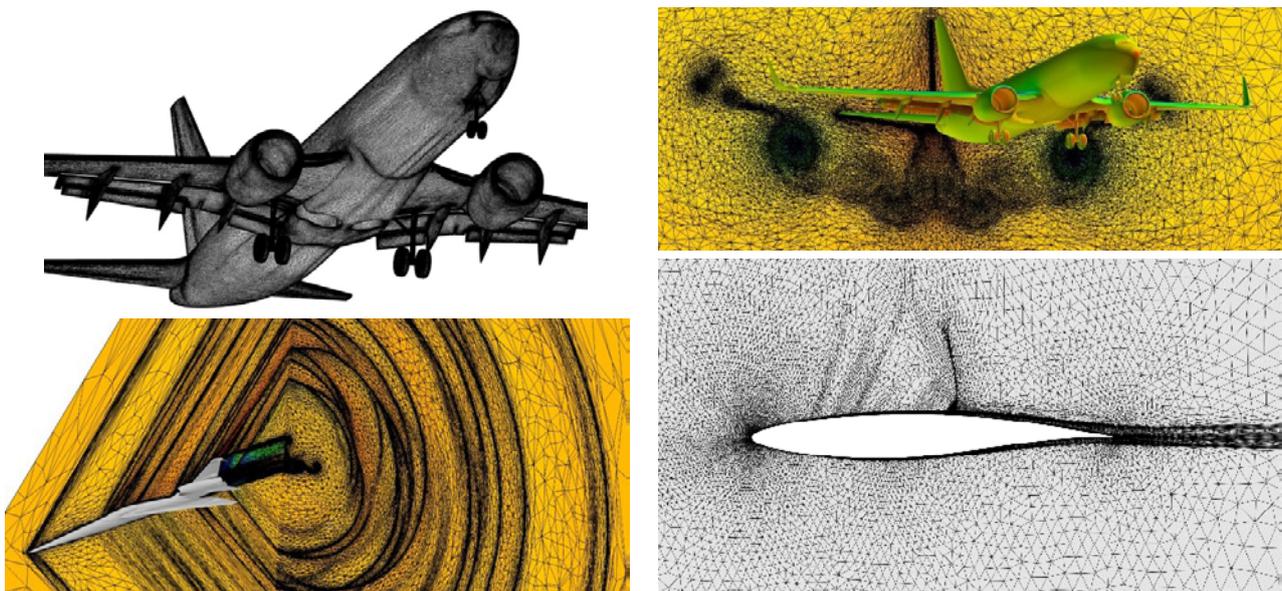


Figure 3. Maillages adaptatifs pour applications aéronautiques aux basses et aux hautes vitesses. Avec la permission de T. Michal de The Boeing Company pour les trois premières, et de F. Alauzet et L. Frazza de l'INRIA pour la quatrième.

par la communauté de recherche en turbulence, et donc le lecteur jugera.

On commence par la simulation directe ou DNS. Un bel exemple fourni par New Technologies and Services à Saint-Petersbourg (NTS) est présenté Figure 4. Sur l'imitation de visualisation strioscopique, on voit une grande « quantité » de turbulence (déjà dans cette coupe bidimensionnelle), de même que le décollement et l'onde de choc. Cette DNS est en bon accord avec l'expérience. Elle a été possible il y a quelques années grâce aux moyens informatiques généreusement fournis par le laboratoire Argonne. Le calcul a demandé entre autres un code d'ordre élevé, quelques milliards de points, un générateur de turbulence synthétique performant (voir une figure ci-dessous), et une grande expérience.

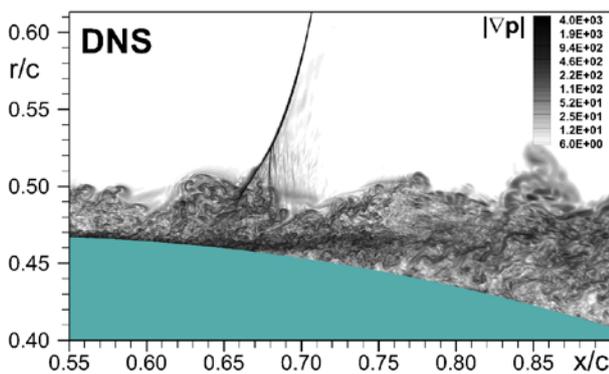


Figure 4. Gradient de pression dans la DNS de l'écoulement de Bachalo et Johnson à la NASA. Avec la permission de M. Strelets à NTS.

On verrait donc la fin du problème, si l'on avait des moyens de calcul infinis. La simulation de NTS ne couvre qu'une tranche étroite de l'écoulement, et donc un volume extrêmement petit par rapport à la région turbulente sur un avion de ligne, et aussi un temps très court. Si l'on intègre la quantité $1/\eta^3$ dans ce domaine, où η est la longueur de Kolmogorov, on obtient une sorte de « volume adimensionnel » de la turbulence, qui se place vers 10^{19} (Andrey Garbaruk, communication personnelle 2021). On sait que le maillage en DNS peut être un peu plus grossier que η , mais l'écart entre les « quelques milliards » ou 10^{10} de 2020 et 10^{19} est considérable. Dans les années 90, on prévoyait la DNS d'un avion grandeur vers 2080, mais il paraît maintenant possible qu'elle ne se fasse jamais, à moins peut-être d'une avancée révolutionnaire dans le calcul quantique.

À l'autre extrême, on a la représentation RANS classique. Celle-ci est conceptuellement simple, mais l'auteur a introduit le concept de « Paradoxe Fondamental » de cette approche. Ceci n'est pas du tout l'argument classique que les équations qui en principe gouvernent les moments de la turbulence ne sont pas « fermées », à cause de la non-linéarité des équations d'origine (cette non-linéarité est la même en 2D et en 3D, mais la turbulence est entièrement différente, ce qui nuit fortement à cet argument). La figure 5 vise à révéler l'idée physique/mathématique sur le cas du cylindre, qui partage la physique des écoulements de tous les jours avec décollement massif. A gauche, un instantané de la simulation de type DES, donc tridimensionnelle et instationnaire. A droite, l'écoulement moyenné de Reynolds. Il est lisse et symétrique. L'écoulement instantané en est loin ; de plus, par exemple au point (1,5; 0), à certaines phases du lâcher de tourbillons le fluide est irrotationnel, et à d'autres phases il est rotationnel et turbulent. On fait donc crûment la moyenne de phénomènes profondément différents. On demande ensuite à un modèle rudimentaire, ayant au plus sept équations, de fournir les contraintes de Reynolds comme si la situation était une variation simple et bien comprise d'un écoulement élémentaire, par exemple la turbulence isotrope. De plus, les besoins de la MFN imposent un modèle presque entièrement local, c'est-à-dire dont l'équation différentielle ne dépend que du voisinage du point en question (les valeurs et quelques dérivées), alors que la physique montre bien que la moyenne à (1,5; 0) dépend de ce qui se passe dans tout le domaine. Cette objection vise le cœur de la modélisation RANS, et est peu liée au niveau du modèle ; de fait, les modèles aux contraintes de Reynolds devraient « logiquement » être nettement plus précis que les modèles à viscosité turbulente (EVM, *Eddy Viscosity Model*), et ce n'est pas du tout la règle quand on compare avec les EVM modernes. Ce genre de pensée est appliqué par certains à l'approche « *Machine Learning* », qui devrait « logiquement » permettre une quasi-révolution dans la modélisation RANS. Nous verrons au cours des années 2020 si cette prédiction pessimiste et vague se confirme.

Les premières décennies du siècle ont vu la floraison de méthodes intermédiaires entre RANS et DNS, sans utiliser les mots Paradoxe Fondamental mais motivées par le constat que RANS, en face de cas comme le cylindre, progresse à peine. La figure 6 reprend le cas du cylindre en s'appuyant sur quatre modélisations différentes. Le calcul bidimensionnel stationnaire, le même que dans la figure 5b, donne une traînée trop faible. Si l'on applique le même modèle RANS en deux dimensions, mais en

permettant une solution instationnaire, la deuxième figure montre un lâcher de tourbillons, ce qui est physiquement prometteur. Cependant, la traînée est ici trop forte, de même que l'amplitude des oscillations de la portance. La troisième figure est obtenue à l'aide d'une simulation, là encore avec le modèle RANS dans sa forme classique, mais tridimensionnelle ; les tourbillons ressemblent à des vilebrequins. Cette simulation, comme celles d'avant, change peu quand on raffine le maillage à l'infini ; elle est lisse. Elle est encore plus réaliste, et avec les paramètres choisis ici, sa traînée est très bonne. Malheureusement, elle dépend trop de décisions arbitraires dont le choix du modèle RANS (corrections pour la courbure et autres) et de la largeur du domaine quand on applique des conditions-limites périodiques. Cette méthode n'est pas fiable.

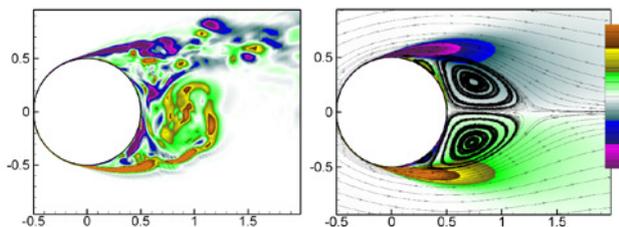


Figure 5. Contours du rotationnel, et lignes de courant dans la figure de droite. Nombre de Reynolds 10^5 , et décollement laminaire. Avec la permission de NTS.

La DES pour finir n'est pas lisse, et exploite tout raffinement de maillage pour créer par la cascade de Kolmogorov des tourbillons de plus en plus serrés. Les équations de la DES réduisent la viscosité turbulente en fonction du maillage pour arriver à cela. La traînée n'est pas mauvaise, mais surtout cette méthode est celle qui est la moins sensible au modèle RANS sous-jacent, à la résolution, et au code. Tout simplement, représenter correctement les tourbillons dominants et appliquer les lois fondamentales de conservation est un moyen physique puissant. La LES et la DES arrivent donc à produire beaucoup de la physique sans aller jusqu'à la DNS. Le grand avantage de la DES sur la LES pure est de représenter la couche-limite comme une région RANS quasi-stationnaire relativement facile, et la région de décollement massif comme une région complexe et imposée par la géométrie (imaginez un cylindre de section carrée ou autre).



Figure 6. Ecoulement autour d'un cylindre 2D. Simulation par approches 1) RANS 2D stationnaire, 2) RANS 2D instationnaire, 3) RANS 3D instationnaire, et 4) DES. Avec la permission de NTS.

Dans une grande mesure, l'utilisateur a le choix du type de calcul, parmi ceux de la figure 6. Il ou elle choisit un modèle RANS pur, et il y a de nombreuses options, ou bien hybride RANS-LES auquel cas l'offre comprend : DES, LNS, VLES, XLES, PANS, PITM, UNI-LES, RSC-LES à tout le moins. Le type de calcul idoine dépend de l'importance du composant en question. Si c'est le corps d'un hélicoptère Chinook ou une cheminée d'usine, on justifie facilement la DES. Si c'est un montant de train d'atterrissage ou un pantographe de TGV, peut-être. Si c'est un rayon de bicyclette, sans doute pas (le moyen le plus sensé de représenter ce rayon, surtout à un nombre de Reynolds de l'ordre de 500, serait une force volumique qui injecte sa traînée dans le champ de vitesses). La simulation stationnaire peut être imposée par un pas de temps plus grand que la période du lâcher de tourbillons, et la physique bidimensionnelle par un maillage latéral grossier.

L'auteur a beaucoup investi dans la DES, et connaît ses défauts. Sa capacité à donner « une solution » quel que soit le maillage est à double tranchant. Le danger est que, si l'on prend une bicyclette par exemple, les raffinements de maillage successifs fassent passer un à un les composants d'un mode turbulent rudimentaire à un mode élaboré : le corps du cycliste, puis ses bras, puis le cadre et les roues, et à la limite les rayons. Les simulations « ambiguës » ont leurs dangers. Il est essentiellement impossible de réaliser et de démontrer la convergence. La méthode n'a d'ailleurs pas d'ordre de précision théorique, à la différence des calculs stationnaires avec champs lisses. Elle n'a pas non plus, après 23 ans d'existence, de procédure de filtrage qui donnerait un objectif solide pour la modélisation. Malheureusement, on peut dire la même chose de la WMLES (Wall

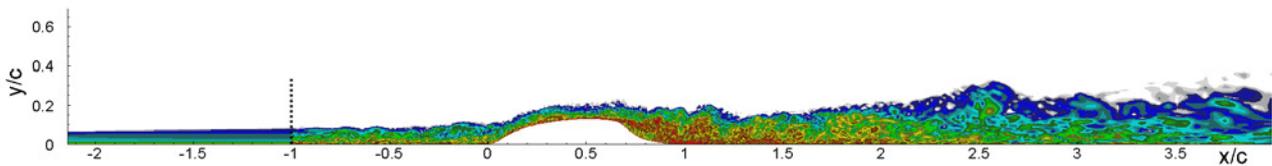


Figure 7. Contours de rotationnel dans une RANS → DES sur une bosse avec décollement (cas NASA « 2D Hump »). Avec la permission de NTS.

Modeled Large Eddy Simulation). Ces deux approches de la turbulence dans la pratique pourraient s'imposer car elles sont les moins mauvaises, mais elles ne sont pas vraiment « propres ».

La figure 7 montre un concept hybride qui n'est pas évident, mais qui pourrait devenir très utile à la longue. Le problème de coût fondamental de la WMLES aux grands nombres de Reynolds prend place dans les régions très minces de la couche-limite car le nombre de cubes nécessaires pour remplir la couche-limite est excessif (ce nombre a été baptisé N_{cubes} , et est l'intégrale sur la paroi de la quantité $1/\delta^2$, où δ est l'épaisseur de couche-limite, si bien que le nombre de points de maillage lui est proportionnel). Dès que la couche-limite a épaissi, en s'éloignant du bord d'attaque, la LES commence à être possible. La figure 7 montre, sur le cas du « 2D Hump » de la NASA, une région RANS avec un champ tout à fait lisse, suivie d'une région LES et d'un champ tridimensionnel instationnaire. Si le calcul est bien mené, la méthode est physiquement bien plus puissante que la méthode RANS pour les couches-limites difficiles, par exemple avec une onde de choc ou en présence du sillage des supports de becs de bord d'attaque. La difficulté est de créer les fluctuations turbulentes, ici à $x = -1$. Dans l'idéal, un jour on aura un calcul RANS préliminaire pour choisir l'emplacement du « passage de témoin », suivi de la génération d'un maillage de nature différente dans les deux régions et bien adapté à δ , et ensuite de l'installation du dispositif de génération de « turbulence synthétique ». Tout ceci serait transparent pour l'ingénieur. Dans le cas présent, tout a été fait « à la main ». On envisage donc une méthode RANS-LES zonale et très élaborée, et on s'approche de l'Intelligence Artificielle.

Des remarques s'imposent quant aux solutions multiples de la figure 2. Certains collègues pensent qu'elles sont dues à la non-linéarité des équations, déjà celles de Navier-Stokes et en plus celles du modèle de turbulence lui-même. Mais alors, on pourrait s'attendre à 100 millions de solutions, alors que la pratique en général n'en donne que deux, ou quelques-unes. De plus, cela ne se

produit que près du décrochage de l'aile, et la non-linéarité n'a pas changé. Donc, au lieu d'un argument mathématique non prouvé, on préfère l'argument physique que le décollement massif conduit à des phénomènes d'hystérésis. On sait depuis toujours que c'est le cas en soufflerie, mais la plage d'incidences qui donnent deux réponses y est bien plus étroite que celle que la MFN prédit, dans l'état de l'art. Les calculs sur des ailes avec hypersustentateurs et nacelles-moteurs montrent qu'une partie de l'aile décroche brutalement dans la solution à basse portance. Certaines études semblent indiquer que ce phénomène s'amenuise dans des maillages extrêmement fins, mais de façon très préliminaire.

Ceci n'est pas une période faste pour la recherche en turbulence, peut-être à cause d'une fatigue générale et des faibles espoirs de percée en théorie ou en modélisation. D'un autre côté, les attitudes se sont améliorées et nous sommes loin des « guerres de religion » entre soufflerie et centre de calcul. On assiste à de nombreux « workshops » et collaborations très internationales, au niveau de l'Europe et à celui du monde. Certains programmes expérimentaux auront des résultats venant de souffleries différentes. C'est moins le cas en DNS, alors que des résultats récents sur le « Speed Bump » montrent que pour des cas au plus semi-complexes, la DNS ne donne pas des résultats « parfaits » contrairement à son image traditionnelle. Presque tous les nouveaux programmes expérimentaux se basent sur des calculs MFN préliminaires, à prendre avec précautions bien sûr car, justement, l'écoulement devrait être difficile. La recherche bénéficie de moyens de calcul amplifiés, et les essais bénéficient de nouveaux moyens de mesure en particulier pour les champs tridimensionnels instationnaires, et aussi le frottement pariétal. Dans l'idéal, on a la comparaison DNS-expérience, mais la tension sur le nombre de Reynolds en DNS reste très forte. Pour tester les théories et les modèles RANS, on préfère des valeurs suffisantes pour donner un écoulement « turbulent d'un bout à l'autre », mais le coût du calcul devient énorme.

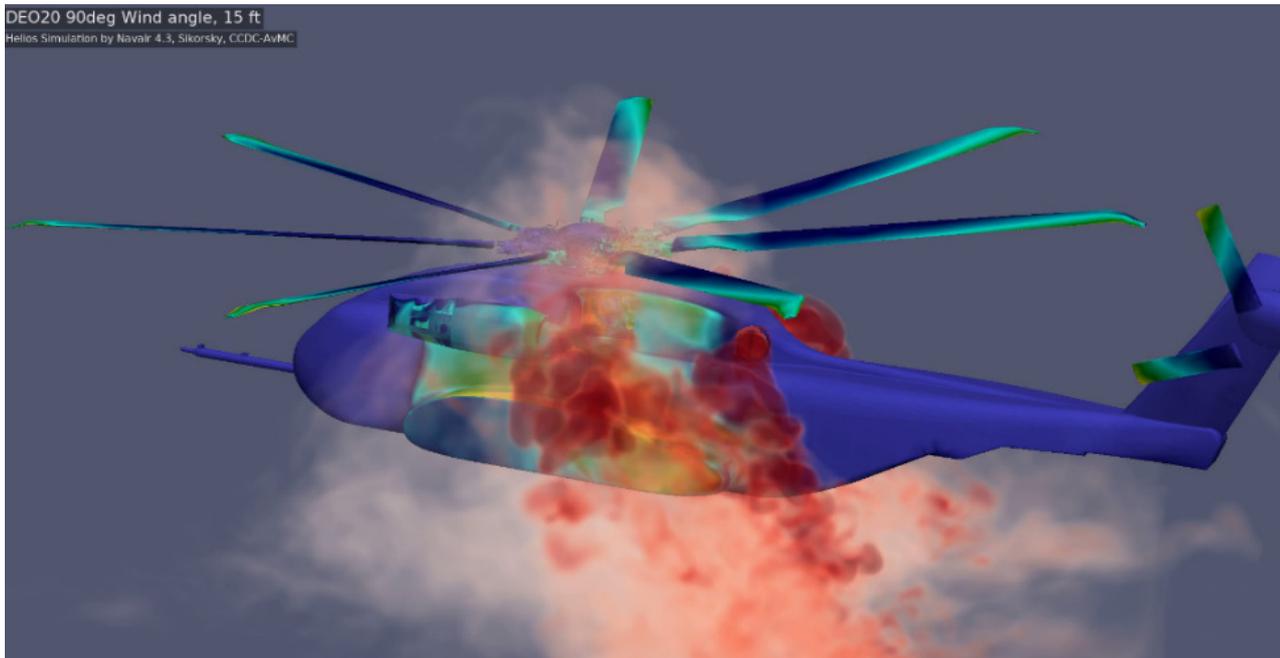


Figure 8. Gaz d'échappement d'un hélicoptère en effet de sol, avec vent latéral. Simulation RANS-LES. Contours de pression sur les pales et iso-surfaces de température dans le domaine. Avec la permission J. Forsythe et CREATE.

Finissons avec la figure 8 pour confirmer la logique des méthodes hybrides RANS-LES. Le besoin était de redessiner les trois échappements pour éviter la re-ingestion des gaz. L'appareil est en effet de sol, avec vent latéral. RANS est tout à fait suffisant pour les pales, mais pas pour les gaz d'échappement. La DES avec un maillage bien conçu produit spontanément une solution efficace, et a permis une grande réduction du coût des essais en vol.

TENDANCES

La MFN nécessitera encore beaucoup de travail dans les années 2020 et au-delà, mais la communauté internationale a une bonne dynamique d'ensemble, et les besoins sont convergents dans de nombreux domaines de l'ingénierie, dont la plupart sont de plus pacifiques (du moins ceux connus de l'auteur). De nombreux milliards d'euros sont en jeu, à commencer par le domaine de la Formule 1 qui en dépense plusieurs chaque année. Les efforts consacrés aux aspects numériques, de logiciel et pratiques, ont toujours été supérieurs à ceux alloués à la turbulence, qui reste un sujet déroutant, difficile à enseigner voire à expliquer. En turbulence, promettre des résultats concrets pour obtenir des financements est chose risquée. Par ailleurs, le travail en numérique est aussi constamment aiguillonné par l'évolution des moyens de calcul, ce qui prévient toute stagnation. En turbulence, une percée dans le domaine de la modéli-

sation RANS pure serait plus que bienvenue (et sera peut-être déclenchée par le Machine Learning). Ceci étant, il y a plus de chances que les méthodes instationnaires « contenant » de la *Large-Eddy Simulation* dans une partie de l'écoulement se popularisent malgré leur coût très supérieur. D'ailleurs, les ressources humaines allouées à ce sous-domaine deviennent assez tangibles, ce qui provient sans doute de la « fatigue » susmentionnée concernant les approches RANS. Il reste cependant difficile d'identifier une méthode particulière qui serait plus en avance et mieux maîtrisée que les autres. Dans nos stratégies de Recherche et Développement, la clarté de vue et une certaine sagesse resteront des choses essentielles.

Remerciements

Frédéric Alauzet, Michel Visonneau et Stéphane Redonnet, qui ont lu et corrigé le manuscrit, sont vivement remerciés. ■

MORPHING D'ARRIÈRE-CORPS POUR RÉDUIRE LA TRAÎNÉE DES VÉHICULES TERRESTRES

par Olivier Cadot, Dept of Mechanical, Materials and Aerospace Engineering, School of Engineering, University of Liverpool, Royaume-Uni, membre de la Commission technique Aérodynamique



Le parcours d'enseignant-chercheur d'Olivier Cadot débute sur un poste de maître de conférence à l'Université du Havre pendant 6 années, après lesquelles il rejoint l'ESPCI en délégation CNRS pour 2 ans. Il est ensuite recruté à l'ENSTA-Paris par voie de détachement pendant 14 ans. Après avoir passé une année sabbatique au département d'Aéronautique de l'Imperial College, il a obtenu un poste "full Professor, chair in Aerospace Engineering" à l'Université de Liverpool au Royaume-Uni, avec la responsabilité du laboratoire d'aérodynamique (Aerolab) et des relations internationales pour la School of Engineering. A son arrivée, il a organisé la réhabilitation des souffleries de recherche et d'enseignement de l'Aerolab avec un budget de £1.5M. Les activités de recherche concernent le contrôle d'instabilités aéroélastiques telle que l'instabilité de flottement rencontrée en aéronautique. La nouvelle activité en aérodynamique instationnaire visant des applications pour les véhicules de surface, sur terre et en mer est en cours de développement.

INTRODUCTION

La forme compacte des véhicules terrestres résulte de l'optimisation du transport des biens et des personnes sous les contraintes de style (« attractivité client »). En contrepartie, elle est synonyme de mauvaise aérodynamique. En effet, les voitures d'aujourd'hui ont un coefficient de traînée (basé sur la surface frontale) de 0,25 au minimum. Pour comparaison, il est supérieur d'au moins un facteur 10 à celui des avions et des sous-marins. En conséquence, la moitié de la puissance mécanique nécessaire pour rouler à 50 km/h est inutilement dissipée sous forme de chaleur par les turbulences de l'air entraîné par le véhicule. Sur autoroute, ce sera 80% de cette puissance qui sera perdue par l'aérodynamique. Une telle inefficacité participe énormément aux émissions de gaz à effet de serre pour lesquelles le secteur des transports de surface est le principal émetteur. C'est dans ce contexte que la Commission européenne imposera aux constructeurs de réduire leurs émissions en dioxyde de carbone de 40% pour 2030. Cette contrainte jugée sévère par les constructeurs est nécessaire pour une économie sans impact climatique. L'amélioration des performances aérodynamiques se présente donc parmi les leviers les plus évidents permettant d'atteindre cette nouvelle norme environnementale. Du point de vue de la mécanique des fluides, les véhicules terrestres sont des corps épais associés à une séparation massive de l'écoulement à l'arrière-corps, siège d'instabilités et de

turbulence. Ce sillage très inhomogène fait intervenir une grande gamme d'échelles d'espace et de temps rendant les approches théoriques et numériques extrêmement ardues. C'est sous l'impulsion des constructeurs Groupe PSA et Groupe Renault qu'une recherche académique s'est établie en France sur cette aérodynamique depuis les vingt dernières années, notamment avec le Centre national de recherche technologique en aérodynamique et aéroacoustique des véhicules terrestres (CNRT R2A), présidé par Vincent Herbert. Les travaux présentés dans cet article sont réalisés dans ce cadre. Des études amonts sont effectuées sur des géométries simplifiées dites "académiques". Ces géométries capturent l'essentiel de la complexité du sillage dans l'objectif d'identifier les potentiels de réduction de traînée. Des applications dites "en échelle 1" sont mises en œuvre sur des véhicules réels dans la soufflerie industrielle du GIE S2A de Montigny-le-Bretonneux partagée entre le Groupe PSA et le Groupe Renault.

RECHERCHE ACADÉMIQUE SUR DES CORPS À CULOTS DROITS

Nos études s'étaient concentrées sur l'aérodynamique de corps tridimensionnels simples avec la thèse CIFRE de Mathieu Grandemange entre le Groupe PSA et ENSTA Paris. Dans le cas de corps axisymétriques, nous avons remarqué que la zone de recirculation présentait une asymétrie permanente [1] pour des régimes d'écoule-

MORPHING D'ARRIÈRE-CORPS POUR RÉDUIRE LA TRAÎNÉE DES VÉHICULES TERRESTRES

ments turbulents où les symétries du forçage devaient pourtant être restaurées. Le même résultat a été reporté simultanément par une équipe de l'Imperial College [2] de manière totalement indépendante et remarquablement complémentaire. Alors que notre contribution portait sur la dynamique globale du champ de vitesse, celle de Rigas et al. 2014 [2] s'intéressait à la dynamique de la distribution de pression au culot. La figure 1 résume la compréhension du sillage turbulent apportée par ces deux articles. Le sillage proche présente une asymétrie produisant un gradient de pression permanent au culot. La dynamique associée est très lente et correspond à une rotation aléatoire du gradient avec d'éventuels sauts de phases, de sorte que sur des temps "anormalement" longs l'axisymétrie de l'écoulement est restaurée statistiquement. En effet, les temps caractéristiques de cette dynamique sont 100 à 1000 fois supérieurs au temps naturel construit sur l'échelle convective du corps. Ce mode très lent est interprété comme la réminiscence du mode statique asymétrique apparaissant à la première bifurcation des sillages axisymétriques laminaires qui s'opère pour un nombre de Reynolds aux alentours de 100. Les autres modes quasi-périodiques qui sont observés à des temps bien plus courts, comme le lâcher tourbillonnaire et les instabilités de couche de mélange, sont transportés par la rotation aléatoire de ce mode quasi-statique dominant la dynamique à grande échelle du sillage. L'asymétrie du mode est associée à un effort latéral, source de traînée induite significative. Il représente donc un réel potentiel pour la réduction de traînée si l'on parvenait à le stabiliser.

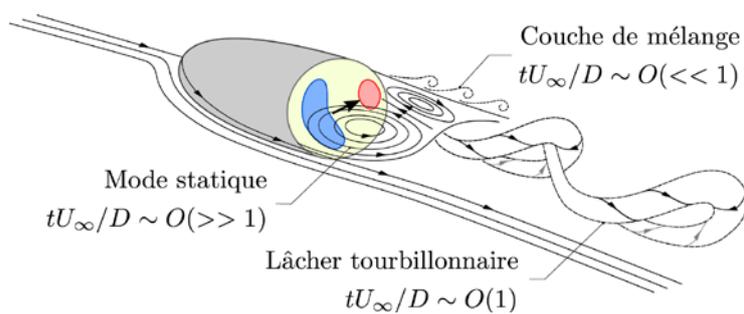


Figure 1. Principaux modes d'un sillage de corps épais. Les zones colorées indiquent les régions de haute (rouge) et basse (bleu) pression du culot. Les structures tourbillonnaires sont représentées en ligne pointillée. La flèche représente le gradient de pression au culot.

Le corps d'Ahmed à culot droit reste une géométrie académique, mais qui se rapproche de celles des véhicules terrestres avec une forme parallélépipédique supportée par quatre cylindres à proximité d'un sol (voir Figure 2).

Une de nos contributions les plus originales [3] est d'avoir montré que l'écoulement autour de ce corps n'échappe pas à la présence du mode statique asymétrique comme illustré sur la figure 3 et qu'elle se traduit par une dynamique bistable à temps longs entre deux états miroirs. Alors que le mode statique explore toutes les directions possibles pour le corps axisymétrique, il n'explore que la direction horizontale dans le cas du corps d'Ahmed, brisant ainsi la seule symétrie de réflexion de la géométrie. Il semble étonnant qu'il ait fallu attendre près de 30 ans après les premiers travaux d'Ahmed et al. 1984 pour découvrir cet effet. Une des explications est sans doute liée aux choix de certaines études expérimentales de n'équiper de sondes que la moitié du corps en se basant à tort sur des arguments de symétrie. La présence du mode statique est aujourd'hui complètement reconnue [4], en accord avec de nombreuses expériences et de plus en plus avec les simulations numériques.

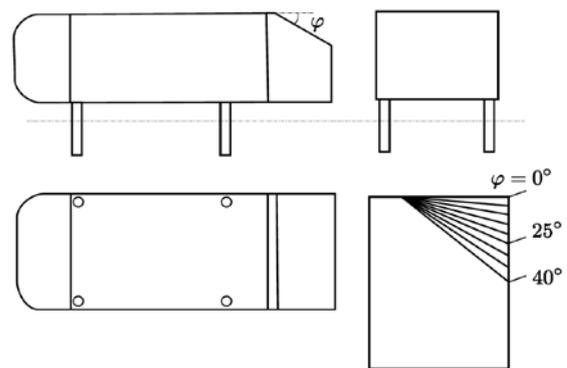


Figure 2. Schéma du modèle simplifié de véhicule terrestre extrait de S.R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin. "Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake," SAE Technical Paper Series, 840300, 1984. Le corps d'Ahmed culot droit est celui pour lequel $\phi = 0^\circ$

Le CNRT R2A nous a permis de réaliser des essais en pleine échelle dans la soufflerie industrielle du GIE S2A et de montrer que le mode statique du corps d'Ahmed persiste au moins jusqu'au nombre de Reynolds des véhicules terrestres ($Re \sim 10^7$) avec en plus une route défilante et des roues tournantes. En fait, pour des gardes au sol supérieures à 10% de l'épaisseur des corps (ce qui est toujours le cas des véhicules grand public), le mode statique n'est sensible qu'au rapport d'aspect du culot rectangulaire et choisit le plus souvent sa direction le long du grand axe du culot [3]. Un culot plus large que haut, comme dans le cas de la figure 3, produit une asymétrie horizontale que nous nommons instabilité y. Pour un corps plus haut que large, le mode statique asymétrique

est dirigé verticalement et appelé instabilité z. Dans ce dernier cas, la présence du mode n'est pas associée à une dynamique bistable car il n'y a pas de brisure de symétrie au sens strict et le sillage se trouve le plus souvent bloqué dans un des deux états verticaux accessibles.

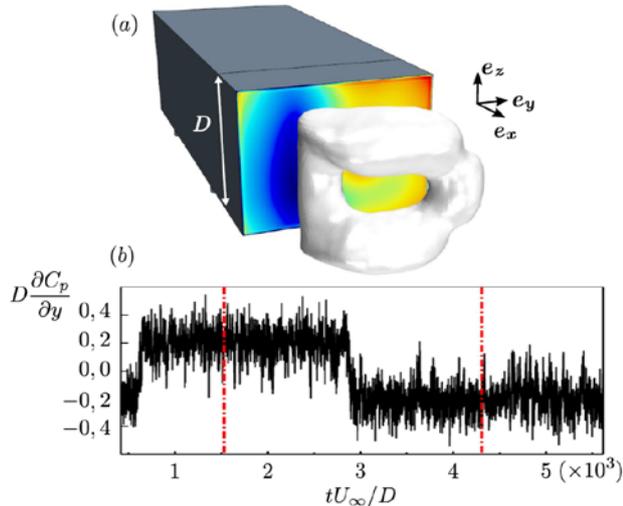


Figure 3. Simulation numérique du corps d'Ahmed [4], $Re \approx 105$. Mode statique asymétrique (a), les zones colorées indiquent les régions de haute (rouge) et basse (bleu) pression du culot. Le tore blanc est une surface de basse pression constante à l'intérieur de la zone de recirculation. Dynamique bistable du gradient de pression (b) au culot.

Nous avons cherché plusieurs techniques de contrôles pour éliminer ce mode. Antoine Evrard a été financé par le CNRT R2A pendant un an pour réaliser des essais dans la soufflerie 2/5 du GIE S2A, en grande partie pour travailler sur ce sujet [5]. Les techniques les plus efficaces pour supprimer le mode asymétrique sont la présence d'une cavité de culot, le placement d'un cylindre de contrôle au centre de la recirculation et l'aspiration au culot. Dans chaque cas, l'asymétrie permanente du sillage est considérablement réduite comme l'illustre la figure 4. D'autres effets que la seule suppression du mode peuvent aussi significativement affecter la traînée du sillage symétrisé. Dans le cas de la cavité au culot, la réduction de 10% de traînée est très certainement amplifiée par la conséquence de l'allongement de la recirculation dans l'intérieur du corps. Pour l'aspiration, la contribution du mode n'est pas mesurable car la traînée est toujours augmentée à cause de la réduction de la zone de recirculation. La technique la plus pertinente semble être le cylindre de contrôle qui donne 4-5% de réduction de traînée. Ainsi, il est raisonnable d'estimer la contribution du mode statique de 4 à 5% de la traînée totale.

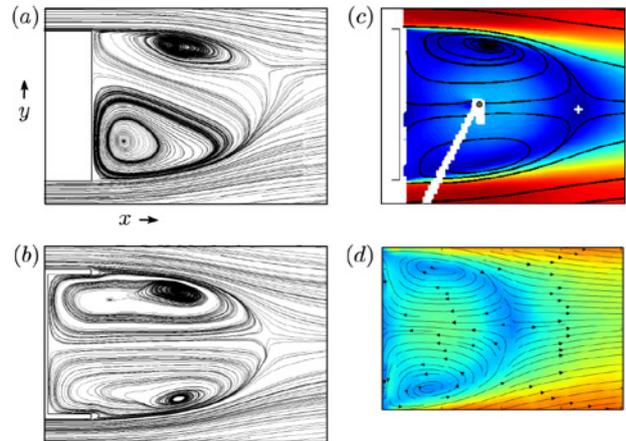


Figure 4. Suppression du mode asymétrique statique (a) avec une cavité (b), un cylindre de contrôle (c), une aspiration au culot (d).

VÉHICULES RÉELS

La thèse de Guillaume Bonnavion cofinancée par le CNRT R2A et l'ENSTA Paris avait entre-autres pour objectif de démontrer la présence du mode statique pour des véhicules réels de type monospaces avec des essais à échelle 1 dans la soufflerie industrielle du GIE S2A. La visualisation en temps réel de la dynamique de la distribution de pression au culot des voitures fut primordiale pour le succès de ces recherches. Aucune des voitures testées n'a de sillage bistable avec une asymétrie horizontale comme c'est observé pour le corps d'Ahmed de la figure 3. On se doute bien qu'une telle voiture ne franchirait pas les étapes du développement aérodynamique du constructeur vu les larges fluctuations qui lui seraient associées. Cependant, cette observation n'élimine pas pour autant la présence du mode statique car il peut aussi se trouver dans la direction verticale (instabilité z) comme pour un corps d'Ahmed avec un culot droit plus haut que large. Dans ce cas, l'identification d'un mode statique bloqué dans un des deux états accessibles s'avère plus compliquée. En effet, l'asymétrie résultante du sillage pourrait tout naturellement être attribuée à l'absence évidente de symétrie de la géométrie dans la direction verticale et non pas à une instabilité associée à une quelconque brisure de symétrie. L'astuce est de trouver une bi-stabilité verticale par des effets compensatoires produits par un changement d'assiette, un dérapage ou par un changement du débit des entrées d'air frontales du véhicule. Les essais en soufflerie industrielle ont ainsi consisté à balayer ces configurations avec à disposition un diagnostic direct de la dynamique du sillage fourni par la distribu-

tion instantanée de pression au culot comme montrée figure 5 pour le Citroën Berlingo. Cette stratégie avait été développée à échelle réduite sur un corps d'Ahmed présentant une instabilité z . Bien que les géométries industrielles soient bien plus complexes que le corps d'Ahmed avec en plus des roues tournantes et une route défilante, on retrouve les mêmes transitions discrètes du gradient de pression au culot marquées par des régimes bistables [6] démontrant sans ambiguïté l'existence du mode statique pour les véhicules industriels. La figure 5b montre l'effet du régime bistable sur la portance du Citroën Berlingo. La figure 6 illustre la transition discrète complète en assiette du Citroën Berlingo entre les deux branches constituées des états P et N verticaux du sillage. La dynamique bistable est observable pour les assiettes telles que les deux états sont présents. Pendant la dynamique bistable de la figure 5b, l'état P présente un coefficient de portance de 0,09, inférieur à celui de l'état N de 0,14. Cette différence de portance entre les deux états représente 15% du coefficient de traînée, montrant que l'instabilité a effectivement un impact significatif sur le chargement aérodynamique du véhicule. Cette augmentation de la portance sur l'essieu arrière du véhicule peut même devenir problématique selon les conditions rencontrées (par exemple, freinage d'urgence à haute vitesse). On trouve que l'état P a un plus faible coefficient de traînée que l'état N, s'expliquant probablement par un effet de traînée induite. Ce n'est sans doute pas un hasard si l'état P est aussi l'état du sillage bloqué de la configuration de référence, résultant de l'optimisation aérodynamique du constructeur. Nous avons retrouvé ce même état P favorable pour les configurations de référence des Peugeot 5008, 3008, Partner et Renault Kangoo.

Un application directe intéressante est l'observation du changement d'état du sillage par la fermeture de l'entrée d'air frontale pour le Kangoo Renault dans sa configuration de référence [6]. La fermeture de l'entrée d'air est souvent envisagée pour réduire efficacement la traînée d'un véhicule dans des conditions de roulage ne nécessitant pas ou peu de refroidissement. Quand on empêche l'air d'entrer dans le bloc moteur, on obtient généralement une réduction de traînée de 5 à 10%. Cette réduction pourrait être pénalisée si la fermeture faisait basculer le sillage dans l'état N. Les vents traversiers et le changement d'assiette du véhicule rencontrés pendant les conditions réelles de conduites sont autant d'évènements capables de faire basculer le sillage dans l'état le moins favorable à la traînée. Cette application motive la direction des recherches entreprises à l'Université de Liverpool, qui est de concevoir un contrôle adaptatif

minimisant la traînée du véhicule pour des conditions de conduites variables.

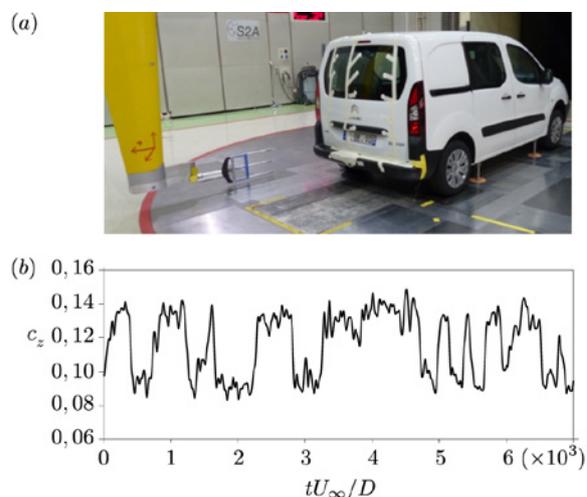


Figure 5. Essais à échelle 1 du Citroën Berlingo [6]. Les mesures de pression sont visibles sur le culot (a), elles permettent d'observer la dynamique du gradient de pression en directe. (b) Effet de la dynamique bistable sur le coefficient de portance trouvée pour une assiette de et l'entrée d'air fermée.

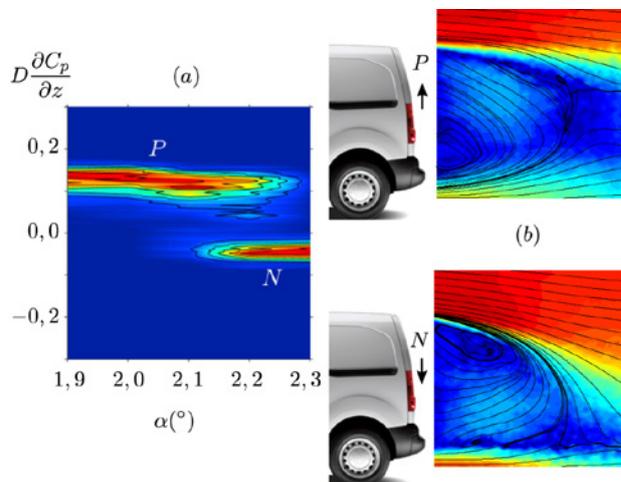


Figure 6. Essais à échelle 1 du Citroën Berlingo [6]. La transition discrète en fonction de l'angle d'assiette entre les états P et N du gradient de pression vertical est évidente (a). Etats P et N (b) du champ de vitesse obtenus de part et d'autre de la transition.

CONTRÔLE ADAPTIF PAR MORPHING

Dans la continuité de ces recherches, notre vision à Liverpool est de proposer une solution pour réduire la traînée des véhicules terrestres de type Monospace et Sport Utility Vehicle. La stratégie est basée sur l'exploitation du potentiel de réduction de la traînée dans des

conditions réelles de conduite comprenant essentiellement des variations de vents traversiers et d'assiette du véhicule. Les vents, plutôt localisés sur le littoral, sont capables de modifier significativement l'angle d'incidence du vent relatif des véhicules même lorsqu'ils évoluent sur voies rapides. Au Royaume-Uni, le vent moyen produit un angle de vents relatifs de 12° sur les véhicules roulant sur les axes nord/sud allant jusqu'à provoquer une augmentation de 20% de la traînée. Le projet vise ainsi à développer un module d'arrière-corps qui modifie activement sa forme pour minimiser la traînée sur toute l'enveloppe de conduite. Le principe est de bénéficier au premier ordre de l'effet classique de rétreint en jouant sur l'angle de séparation du bord de fuite du module et au deuxième ordre de maintenir l'état du sillage favorable. L'actionneur, réalisé en élastomère, répondra à des contraintes industrielles : faible consommation d'énergie, faible coût de fabrication, pas de pénalisation en termes acoustiques et de style et conçu pour être monté sur une voiture de série à l'endroit habituel du becquet. Pour les essais aérodynamiques, nous disposons à Liverpool de deux souffleries subsoniques, chacune ayant une section d'essai de $0,6 \times 1,2 \times 2,4 \text{ m}^3$ pour une vitesse maximale de 35 m/s. Développé dans un premier temps sur un corps simplifié à échelle réduite présentant l'instabilité z (voir Figure 7a), le projet démontrera la capacité d'un contrôleur adaptatif à réduire la traînée dans des conditions de conduite changeantes. Des formes d'arrière-corps innovantes devraient apparaître au cours de l'avancement du projet, car le morphing permettra un large éventail de déformations du bord de fuite (voir Figure 7b). Dans un second temps, un module de morphing à pleine échelle sera fabriqué et validé, avec notamment une caractérisation du champ de vitesse de la couche de mélange en fonction de la déformation statique.

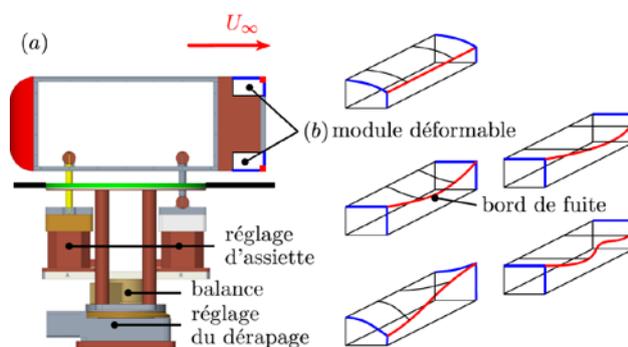


Figure 7. Principe du corps simplifié de véhicule pilotable en dérapiage et en assiette simulant des conditions de conduites variables (a). Des modules déformables (b) assureront un rétreint s'adaptant aux conditions de conduites pour réduire la traînée.

EN GUISE DE CONCLUSION

L'amélioration des performances aérodynamiques des véhicules terrestres est un défi qui consiste à obtenir une réduction de traînée significative avec une forme la plus compacte possible. Notre contribution sur la compréhension du mode statique de la zone de recirculation ne révèle certes qu'un potentiel de 4 à 5%, mais qui pourrait s'ajouter à d'autres potentiels. L'exploitation des conditions réelles de conduites permettrait d'atteindre des réductions supérieures à 15 %. Nous restons quand même bien loin des coefficients de traînée des corps profilés comme les avions et les sous-marins, nécessitant des réductions de 90%. D'autres solutions que l'optimisation aérodynamique des véhicules sont aussi envisagées, telles que la conduite en convoi sur les voies rapides (platooning). En formant des convois de véhicules suffisamment rapprochés, c'est-à-dire bien en deçà des distances de sécurités, on pourrait alors atteindre des réductions de traînée de l'ordre de 50% par véhicule. Il s'agit par contre de régler le problème de sécurité routière par le biais de communications entre véhicules.

Remerciements

Guillaume Bonnavion est chaleureusement remercié pour la lecture critique de cet article.

Références

[1] M. Grandemange, M. Gohlke, and O. Cadot. Statistical axisymmetry of the turbulent sphere wake. *Experiments in fluids*, 55(11):1-10, 2014.

[2] G. Rigas, A.R. Oxlade, A.S. Morgans, and J.F. Morrison. Low-dimensional dynamics of a turbulent axisymmetric wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 755:159, 2014.

[3] M. Grandemange, M. Gohlke, and O. Cadot. Bi-stability in the turbulent wake past parallelepiped bodies with various aspect ratios and wall effects. *Physics of Fluids*, 25:95-103, 2013.

[4] Y. Fan, C. Xia, S. Chu, Z. Yang, and O. Cadot. Experimental and numerical analysis of the bi-stable turbulent wake of a rectangular flat-backed bluff body. *Physics of Fluids*, 32(10):105111, 2020.

[5] A. Evrard, O. Cadot, V. Herbert, D. Ricot, R. Vigneron, and J. Délerly. Fluid force and symmetry breaking modes of a 3D bluff body with a base cavity. *Journal of Fluids and Structures*, 61:99-114, 2016.

[6] G. Bonnavion, O. Cadot, V. Herbert, S. Parpais, R. Vigneron, and J. Délerly. Asymmetry and global instability of real minivans' wake. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 184:77-89, 2019. ■

PRIX 3AF : DÉTECTER DES IMPACTS PAR SURVEILLANCE VIBRATOIRE : UNE STRATÉGIE POUR AMÉLIORER LA MAINTENANCE DES STRUCTURES D'INGÉNIERIE

par Dimitri Goutaudier, chercheur postdoctoral du CNRS¹, membre d'Alumni-ONERA

Dimitri Goutaudier est lauréat du prix « jeunes actifs », décerné par la 3AF en 2020 pour les travaux présentés dans cet article. Diplômé de l'École centrale de Nantes, il a réalisé une thèse à l'ONERA et au CNAM pour le compte d'Airbus. Il est actuellement post-doctorant au CNRS avec l'objectif de développer une méthode numérique pour la simulation d'endommagements des matériaux composites par choc laser.

INTRODUCTION

La détection d'impact à partir de mesures vibratoires est un sujet de recherche important dans le domaine de la surveillance des structures. La position de l'impact étant une inconnue du problème, l'objectif est d'utiliser des mesures indirectes de capteurs installés sur la structure, tels que des accéléromètres, pour identifier les événements d'impact à partir des vibrations qu'ils induisent. Cela peut permettre d'évaluer en temps réel l'intégrité d'une structure, mais aussi d'optimiser des procédures de maintenance.

Les opérations aéroportuaires mettent en jeu plusieurs véhicules se déplaçant autour d'un avion au sol (voir Figure 1). Divers équipements, tels que camions de fret, convoyeurs à bande ou passerelle passagers, opèrent autour du fuselage et viennent à son contact. Les procédures d'approche sont strictes mais il arrive que certains impacts se produisent. Un opérateur doit alors rapporter l'événement et le décrire avec précision dans un formulaire à l'attention de la compagnie aérienne. Si les endommagements sont facilement identifiables sur les fuselages métalliques (éraflures, bosses etc.), certains sont invisibles à l'œil nu sur les fuselages composites, comme celui de l'A350. En effet, des impacts d'une certaine énergie peuvent créer des endommagements internes (délamination, décollage de clip, etc.), alors que la peau extérieure du fuselage retourne élastiquement à sa position initiale.

Pour cela, les fuselages composites sont régulièrement inspectés à l'aide de techniques non destructives de détection d'endommagement. Toutefois, ces inspections sont onéreuses et peuvent immobiliser l'avion pendant plusieurs heures. Il est donc pertinent de disposer d'un système de détection d'impact et d'évaluation de sa sévérité, qui permettrait d'optimiser ces procédures de maintenance et de réduire les temps d'immobilisation de l'avion.

Du point de vue scientifique, identifier un impact à partir de mesures vibratoires constitue un problème inverse comportant trois niveaux : détecter l'événement, le localiser, et évaluer sa sévérité en reconstruisant le chargement appliqué. Cet article traite de la seconde étape, la localisation, pour laquelle les travaux de l'auteur ont apporté une solution originale et efficace, qui a été validée sur un avion Airbus A350.

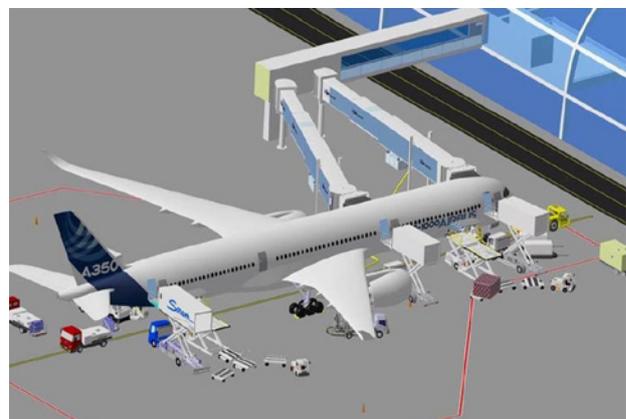


Figure 1. Coactivité autour d'un avion au sol (Extrait de [1].)

1. Laboratoire PIMM, CNRS UMR 8006, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris.

TRIANGULATION DANS LE DOMAINE TEMPOREL

Une technique couramment utilisée, pour localiser un impact à partir de mesures vibratoires, consiste à détecter les temps d'arrivée à différents capteurs des ondes mécaniques induites par le choc. Ces temps d'arrivée sont soustraits deux-à-deux, pour déterminer des retards d'arrivée entre chaque paire de capteurs. On peut alors identifier, à l'aide d'un modèle de propagation d'onde, pour chaque retard entre chaque paire de capteurs, un ensemble de points d'impact possibles, appelé ligne d'iso-propagation [2]. Géométriquement, le point d'impact se trouve à l'intersection de ces lignes, mais il se peut qu'elles se coupent en plusieurs points. Le défi consiste alors à mailler la structure de capteurs, de sorte que toute position d'impact conduite à un unique point d'intersection, et donc à une seule solution du problème de localisation (voir Figure 2).

Cette technique, dite de triangulation dans le domaine temporel, est abondamment étudiée dans la littérature scientifique, car elle ne présuppose aucune hypothèse sur le chargement appliqué, si ce n'est que l'impact est ponctuel. Par ailleurs, le modèle de propagation d'onde peut être analytique si le milieu est suffisamment simple, numérique si l'on dispose des informations nécessaires pour effectuer des simulations, ou expérimental si l'on peut effectuer des essais sur la structure.

Cependant, la triangulation nécessite par construction plusieurs capteurs, à fréquence d'échantillonnage élevée, pour détecter le passage des ondes mécaniques, qui se déplacent typiquement dans les métaux avec une

vitesse de l'ordre du km/s. En théorie, pour identifier les deux coordonnées d'un impact appliqué sur une surface, il faut au moins connaître deux retards d'arrivée, ce qui nécessite d'utiliser au moins trois capteurs. En pratique, toutefois, le nombre de capteurs est d'autant plus élevé que le milieu de propagation présente des hétérogénéités et des obstacles aux ondes. Il en résulte que cette technique peut devenir prohibitive si l'on souhaite localiser un impact pouvant avoir lieu sur une très grande surface, comme un fuselage d'avion, du fait des coûts, de l'encombrement, et des difficultés de maintenance associés à un tel maillage de capteurs.

RÉDUIRE LE NOMBRE DE CAPTEURS EN UTILISANT LA RÉPONSE VIBRATOIRE GLOBALE

Plutôt qu'utiliser la réponse locale du milieu de propagation, sensible au passage des ondes, une autre approche consiste à utiliser la réponse vibratoire globale de la structure. En effet, une mesure vibratoire consécutive à un impact, prélevée par exemple avec un accéléromètre, se divise typiquement en trois régions : le repos, le passage des ondes, et des oscillations amorties. Si l'impact est d'énergie suffisante, alors la phase de propagation d'onde, d'une durée typique de quelques microsecondes, est suivie d'un régime d'oscillations amorties, mettant en vibration l'ensemble de la structure durant typiquement quelques secondes. Utiliser cette réponse globale permet donc d'utiliser des capteurs à plus basse fréquence d'échantillonnage, et en principe en nombre moins élevé, du fait que ces vibrations sont perceptibles sur l'ensemble de la structure.

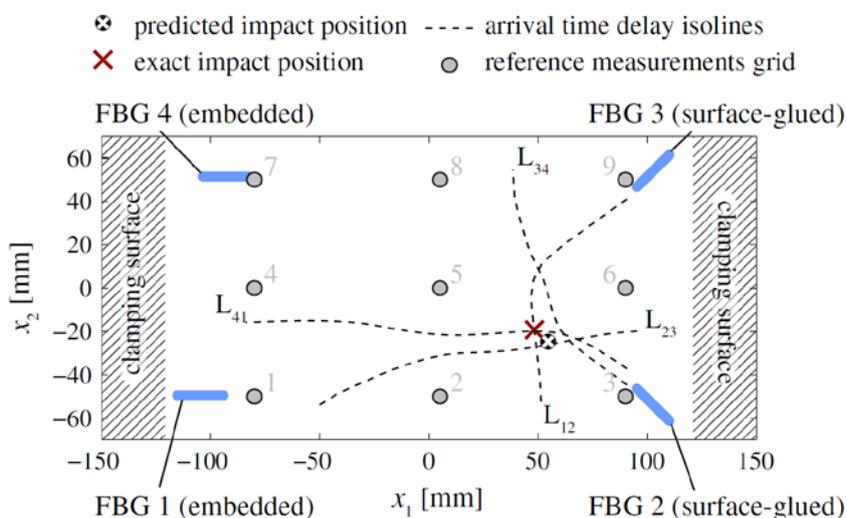


Figure 2. Lignes d'iso-propagation et triangulation du point d'impact (Extrait de [2])

PRIX 3AF : DÉTECTER DES IMPACTS PAR SURVEILLANCE VIBRATOIRE : UNE STRATÉGIE POUR AMÉLIORER LA MAINTENANCE DES STRUCTURES D'INGÉNIERIE

De nombreuses méthodes de localisation utilisant la réponse globale ont été proposées. En première approximation elles se divisent en deux catégories : les méthodes par balayage et les méthodes par apprentissage. Les méthodes par balayage consistent à résoudre un problème d'optimisation à partir d'un modèle de réponse de la structure. Il s'agit de réduire un écart entre les prévisions du modèle et les mesures effectuées en variant la position de l'impact. On retient en fin de parcours le point d'impact réduisant au mieux cet écart [3]. Les méthodes par apprentissage procèdent différemment, en deux temps, avec une phase hors-ligne d'entraînement, réalisée une fois pour toutes, suivie d'une phase en temps réel de localisation. Plus précisément, la phase d'entraînement consiste à réaliser une campagne d'impacts-mesures, laquelle pouvant être expérimentale ou virtuelle, afin d'entraîner un algorithme de localisation fondé sur des méthodes statistiques ou un réseau de neurones [4]. Puis, la phase de localisation en temps réel consiste à utiliser cette base de données, ou les paramètres d'un algorithme calibré par rapport à ces données, pour identifier un impact à partir d'un nouveau jeu de mesures.

COMPRESSION LINÉAIRE PAR SUPERPOSITION MODALE

Bien qu'efficaces, et conduisant à des résultats prometteurs avec moins de capteurs, on constate que ces approches utilisant la réponse globale s'éloignent de la compréhension du phénomène d'impact, au contraire des méthodes de triangulation qui ont une motivation physique claire. Les méthodes par balayage et par apprentissage sont en fait davantage des procédures générales de résolution d'un problème inverse, à partir d'un modèle de réponse et des mesures ponctuelles, plutôt que des méthodes dédiées à la localisation d'impact.

La démarche suivie dans les travaux de l'auteur a consisté à développer une méthode de localisation utilisant la réponse globale, pour réduire le nombre de capteurs et s'affranchir d'une modélisation fine de la structure, mais fondée sur des raisonnements physiques, pour en déterminer théoriquement les performances de précision et de robustesse, à l'instar des techniques de triangulation.

La méthode proposée repose sur le principe bien connu en dynamique de superposition modale. L'idée consiste à décrire le régime d'oscillations amorties par une superposition de modes de vibration, qui correspondent à des déformations spécifiques de la structure oscillant à des fréquences particulières, appelées fréquences propre (voir Figure 3). D'un point de vue mathématique, ce principe de superposition permet de décrire un signal temporel mesuré $s(t; \mathbf{F})$, consécutif à un impact ayant lieu en un point \mathbf{F} , par la relation suivante ² :

$$s(t; \mathbf{F}) \approx a(t) \cdot z(\mathbf{F}) = a_1(t)z_1(\mathbf{F}) + a_2(t)z_2(\mathbf{F}) + \dots$$

où les coefficients dans le vecteur $a(t)$ dépendent de l'emplacement du point de mesure, de l'historique du chargement, et des propriétés modales de la structure. Ces dernières peuvent être identifiées expérimentalement ou numériquement, à l'aide de techniques d'analyse modale.

La propriété remarquable de cette expression est qu'elle sépare l'action du point d'impact \mathbf{F} , au sens où son image dans la réponse vibratoire est le vecteur $z(\mathbf{F})$, si bien que le modèle de réponse peut être vu comme un modèle linéaire par rapport à ce vecteur image. Or, il est aisé d'identifier un tel modèle, à l'aide de procédures bien connues, et l'auteur a montré dans ses travaux qu'il existe des emplacements de capteurs judicieux, permettant d'optimiser la robustesse de cette identification, face à du bruit de mesure ou des perturbations vibratoires.

En théorie, la somme dans l'expression ci-dessus se poursuit à l'infini, mais avec des contributions de plus en plus faibles, pourvu que l'on numérote les modes de vibration par ordre croissant de leurs fréquences propres. Ainsi, les modes associées à des fréquences très élevées contribuent très peu à la réponse, de sorte que l'on peut tronquer la somme à un certain rang. On réalise alors une compression du modèle de réponse, au sens où l'on ne retient que quelques modes dans l'analyse. Cette compression est par ailleurs qualifiée de linéaire, puisqu'il apparaît que le point d'impact \mathbf{F} ne fait que modifier les proportions dans lesquelles ces modes de vibration sont excités, au travers des coefficients $z_1(\mathbf{F})$, $z_2(\mathbf{F})$, ...

2. Une lettre en gras désigne un vecteur, par exemple $\mathbf{F}=(x,y)$ pour un impact appliqué sur une surface.

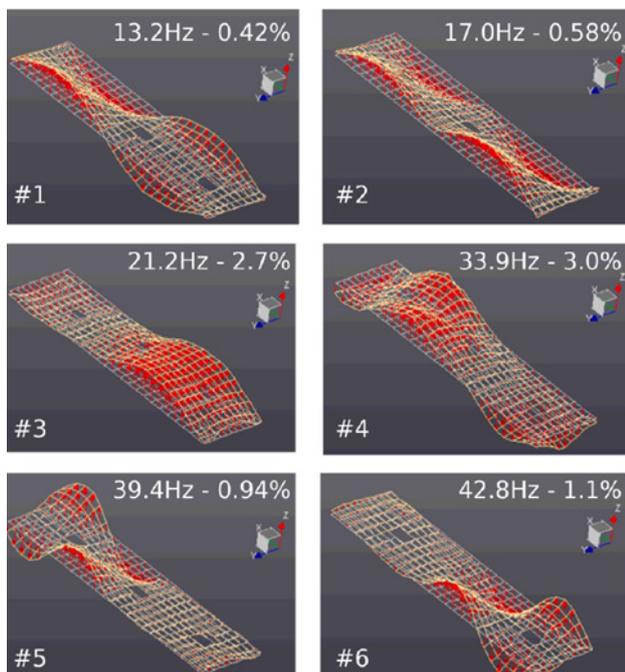
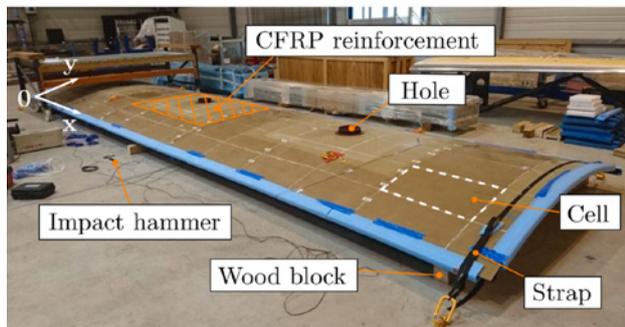


Figure 3. Six modes de vibration d'un panneau composite fabriqué par Airbus, fréquences propres et amortissements modaux (Extrait de [6])

**NOTION DE SIGNATURE MODALE :
VERS UNE TRIANGULATION DANS LE DOMAINE FRÉQUENTIEL**

Il reste maintenant à expliquer comment on peut localiser un point d'impact à partir de son image vibratoire. L'idée centrale est de montrer que le point d'impact excite de façon unique certains modes de vibration. Autrement dit, on souhaite définir une signature modale du point d'impact. Ce travail de définition se divise dans la thèse de l'auteur en trois étapes.

La première étape consiste à raisonner en termes de proportions, c'est-à-dire à s'intéresser aux participations des modes dans la réponse par rapport à un mode de référence. Cela permet de construire une signature invariante par rapport à l'intensité de l'impact, laquelle amplifie ou diminue les participations des modes, mais pas leurs proportions. Remarquons, par ailleurs, que l'on bénéficie également d'une invariance par rapport au choix de la mesure, au sens où l'on peut considérer des mesures de déplacement, vitesse, accélération, ou déformation, sans que cela n'affecte $z(\mathbf{F})$, mais seulement $a(t)$ dans le modèle de compression linéaire.

La seconde étape consiste à définir l'analogie des lignes d'iso-propagation, utilisées dans la triangulation dans le domaine temporel, qui se coupent en un point unique si l'on choisit convenablement l'emplacement des capteurs. Dans ce contexte modal, cela amène à définir des lignes d'iso-proportion, qui se coupent en un unique point lorsqu'on choisit convenablement les modes de vibration dans l'analyse. On réalise ainsi une triangulation dans le domaine fréquentiel. Par exemple, pour

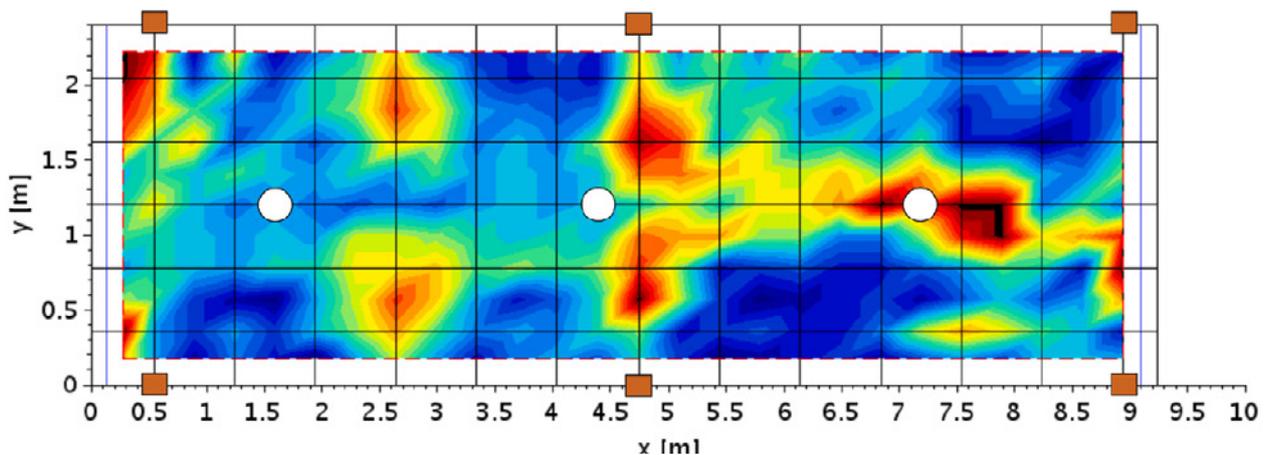


Figure 4. Carte indiquant les zones du panneau composite conduisant à des localisations robustes (rouge) ou peu robustes (bleu) (Extrait de [6].)

PRIX 3AF : DÉTECTER DES IMPACTS PAR SURVEILLANCE VIBRATOIRE : UNE STRATÉGIE POUR AMÉLIORER LA MAINTENANCE DES STRUCTURES D'INGÉNIEURIE

une plaque métallique, on montre analytiquement dans [5] que trois modes de vibration satisfont cette propriété d'intersection unique, pour toute position d'impact. On parle de famille de modes discriminants. En général, cependant, il faut recourir à des techniques numériques pour identifier ces familles.

La troisième et dernière étape consiste à déterminer la robustesse de cette signature modale face à des incertitudes d'identification sur $z(F)$. Cela conduit à introduire une notion de couverture associée à une famille de modes (voir Figure 4). En effet, il apparaît qu'une famille de modes donnée ne permet pas de localiser un impact avec des performances uniformes suivant la position de l'impact. Cependant, on peut établir pour chaque famille une carte qui indique les lieux d'impacts qui conduiront à des résultats de localisation robustes. En pratique, il peut donc être nécessaire d'employer une stratégie de localisation analysant les contributions de plusieurs familles de modes.

VALIDATIONS À PLUSIEURS ÉCHELLES

Une procédure complète de localisation d'impact a été développée sur cette notion de signature modale. Son avantage principal est qu'un nombre très réduit de capteurs est suffisant, et qu'il est relativement aisé d'identifier les propriétés modales de la structure permettant de construire le modèle de compression linéaire.

Des essais expérimentaux ont confirmé qu'il est faisable de localiser des impacts avec un unique point de mesure, ce qui était nouveau par rapport à l'état de l'art. Ainsi, des impacts ont été localisés avec un unique

accéléromètre sur une plaque métallique 40cmx40cm dans [5] et sur un panneau composite Airbus 2mx9m dans [6]. La Figure 5 synthétise les résultats de localisation obtenus pour le panneau composite. On note que la précision est corroborée par la carte présentée en Figure 4 : la zone bleue en bas à droite est associée à de moins bons résultats. Cette procédure a été adaptée dans [7] pour localiser des impacts sur un avion Airbus A350, long de 65 m, avec seulement 6 accéléromètres biaxes.

Ces résultats montrent non seulement que l'approche développée s'applique à des structures complexes, mais aussi qu'elle « passe à l'échelle », au sens où les performances de localisation, rapportées à une dimension caractéristique de la structure, sont similaires.

VERS DE NOUVELLES APPLICATIONS

Enfin, terminons par mentionner que la notion de signature modale développée dans ce travail ne se restreint pas à la localisation d'impact, mais peut se transposer à d'autres situations. En effet, la technique de compression linéaire est abondamment utilisée dans le domaine de la réduction de modèle paramétrique, pour effectuer des prévisions en temps réel. Le terrain est donc ouvert pour définir des signatures modales généralisées, qui permettraient d'identifier des paramètres inconnus à partir de peu de mesures.

Références

[1] D. Goutaudier, *Méthode d'identification d'un impact appliqué sur une structure admettant des modes de vibration basse fréquence faiblement amortis et bien séparés*. Thèse en Mécanique. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2019.

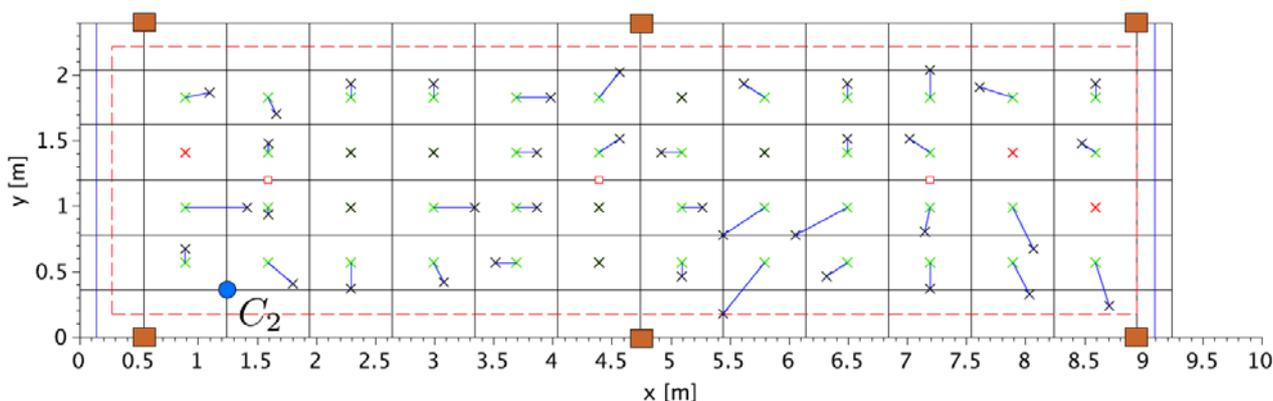


Figure 5. Résultats de localisation obtenus pour le panneau composite. Rond bleu : accéléromètre, croix noire : position réelle de l'impact, croix verte : estimation de la position, croix rouge : aucun point identifié (échec). Extrait de [6].

[2] J. Frieden, J. Cugnoni, J. Botsis, T. Gmür, *Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors – Part I: Impact detection and localization*, *Compos. Struct.* 94 (2) (2012), pp. 438–445.

[3] Q. Li, Q. Lu, *Impact localization and identification under a constrained optimization scheme*, *J. Sound Vib.* 366 (2016), pp. 133–148.

[4] Y. Zhong, J. Xiang, H. Gao, Y. Zhou, *Impact energy level assessment of composite structures using MUSIC-ANN approach*, *Struct. Control Health Monit.* 23 (2016), p. 825–837.

[5] D. Goutaudier, D. Gendre, V. Kehr-Candille, R. Ohayon, *Single-sensor approach for impact localization and force reconstruction by using discriminating vibration modes*, *Mech. Syst. Signal Process.* 138 (2020), article ID 106534.

[6] D. Goutaudier, D. Gendre, V. Kehr-Candille, R. Ohayon, *Long-range impact localization with a frequency domain triangulation technique: Application to a large aircraft composite panel*, *Compos. Struct.* (238) (2020), article ID 111973.

[7] D. Goutaudier, G. Osmond, D. Gendre. *Impact localization on a composite fuselage with a sparse network of accelerometers*. *Comptes Rendus Mécanique*, Tome 348 (2020) (3), pp. 191–209. ■

PRIX 3AF : METTRE EN ORDRE LE PRÉSENT POUR PERMETTRE L'AVENIR : L'EXEMPLE D'UNE THÈSE SUR LA FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE

par Cassiopée Galy, Institut de recherche et technologie Saint-Exupéry, vice-présidente du Groupe régional 3AF Midi-Pyrénées.

Diplômée de l'École nationale supérieure de chimie, de biologie et de physique (ENSCBP) de Bordeaux, Cassiopée Galy est lauréate du prix thèse décerné par la 3AF en 2020 pour les travaux présentés dans cet article, effectués aux Arts et Métiers de Talence, à l'Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux.

Fabrication additive, Impression 3D ou encore Impression tridimensionnelle... ces procédés ont envahis les médias au cours de la dernière décennie. La fabrication additive repousse les limites de l'imaginaire, qu'il soit scientifique ou industriel. Par définition, la fabrication additive est l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique¹. Ces techniques s'opposent donc à la mise en forme par enlèvement de matière (procédés d'usinage) et sont complémentaires à d'autres procédés comme la fonderie. Les procédés de fabrication additive ont longtemps été associés aux techniques de prototypages rapides, mais les développements actuels tendent à les faire évoluer vers des moyens de production à part entière. De nouvelles solutions d'innovations sont rendues possibles par cet ensemble de procédés, représentant ainsi une réelle rupture technologique.

La fabrication additive est complémentaire aux techniques de fabrications dites traditionnelles, et n'a pas vocation à supplanter ces techniques. En revanche, la fabrication additive apporte une réponse technologique à leurs limites. Ainsi de nouvelles perspectives d'innovations voient le jour, telles que la fabrication d'objets personnalisés, en petite série ou sur mesure. Ces avantages intéressent de nombreux secteurs d'activité, comme par exemple, l'aéronautique et l'aérospatial qui voient là un moyen d'accroître la performance de leurs structures en pouvant augmenter de façon optimale le ratio « performances mécaniques/masse ». Aussi, la fabrication additive permet de réduire de façon considérable le nombre de pièces d'un assemblage, et donc de diminuer les étapes de construction et la masse additionnelle liée aux assemblages. À titre d'exemple, suite à

une « reconception additive » d'une buse de carburant du moteur Leap, General Electric a réduit le nombre de pièces de l'assemblage passant de 20 à une unique pièce monolithique, ce qui lui a permis de multiplier la durée de vie de la pièce par 5 tout en diminuant sa masse de 25%².

Les procédés de fabrication additive métallique présentent un vrai potentiel. Parmi ces procédés, la technologie de fusion laser sur lit de poudre (SLM) est celle la plus utilisée aujourd'hui. Elle offre la possibilité de fabriquer des pièces de petites dimensions avec une bonne précision, des états de surfaces corrects, en comparaison aux autres technologies, et pour une large gamme de matériaux métalliques.

La faible densité des alliages d'aluminium, conjuguée à l'optimisation de conception rendue possible grâce aux procédés de fabrication additive, assure un gain de masse des structures conséquent, ce qui intéresse fortement les industriels. Cependant, il est difficile de maîtriser les propriétés finales des pièces en aluminium fabriquées par SLM car de nombreux défauts sont générés lors de la fabrication (porosités, fissuration à chaud, état de surface, etc.). Un des enjeux majeurs est donc de trouver les conditions opératoires optimales permettant l'élaboration par le procédé SLM de pièces en alliage d'aluminium à haute résistance mécanique.

L'étude menée durant la thèse de l'auteure était une des 3 « briques » du projet FUTURPROD dont l'objectif était, en associant des industriels et des chercheurs (voir Figure 1), d'apporter des éléments de réponse pour la maîtrise du procédé SLM, en partant de la conception des pièces jusqu'à leur durabilité et en passant par l'optimi-

1. AFNOR, NF E 67-001, 2011, « Fabrication additive- vocabulaire »

2. <http://www.primante3d.com/ge-injecteurs-fuel-08102018/>, consulté en ligne le 17/09/2019

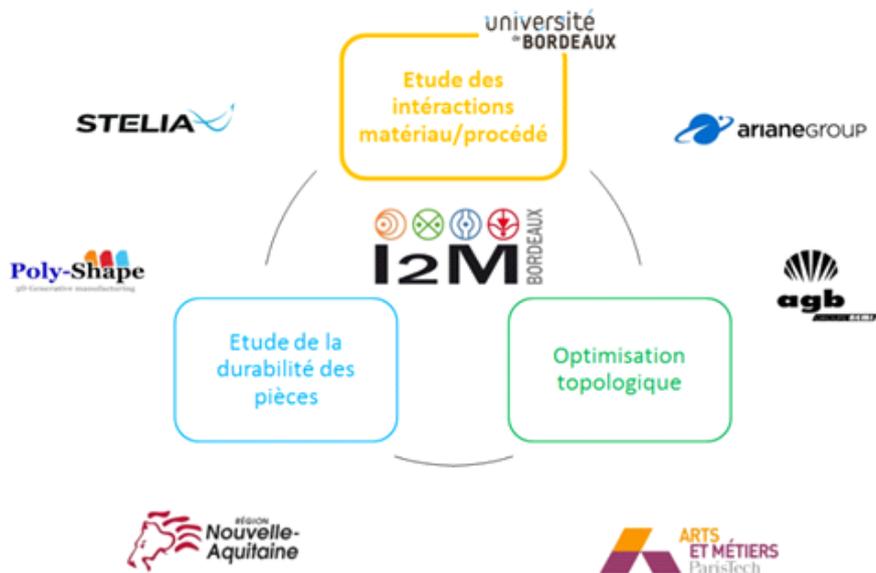


Figure 1. Environnement du projet FUTURPROD

sation du procédé, à partir de recherches sur la compréhension des interactions entre le laser et le matériau et de leurs conséquences sur les caractéristiques des pièces élaborées. La thèse, intitulée « Etude des interactions matériau/procédé en vue d'une optimisation des conditions opératoires du procédé de fabrication additive SLM sur des alliages d'aluminium pour des applications aéronautiques » avait plus précisément pour objectif de développer des modèles, s'appuyant sur des approches expérimentales et numériques, pour étudier l'influence des conditions opératoires et prédire qualitativement les caractéristiques des matériaux élaborés, en termes de microstructures et de propriétés mécaniques.

Ce travail de thèse a mis en évidence la complexité du procédé de fusion laser sur lit de poudres métalliques qui met en jeu (i) de nombreux paramètres opératoires et environnementaux, (ii) de nombreux phénomènes physiques liés aux interactions entre le laser et le matériau et (iii) des changements d'état du matériau et donc de nombreuses variations de ses propriétés au cours du procédé. Les paramètres opératoires incluent les paramètres laser, les caractéristiques de la poudre (qui est la matière première) mais aussi la machine SLM elle-même et l'environnement de construction. Les cycles thermiques induits au cours de ce procédé sont ainsi difficilement maîtrisables et prédictibles actuellement. Le procédé est donc générateur de défauts dont l'identification de l'origine est complexe.

Les études déjà menées sur procédé SLM couvrent de très nombreuses nuances d'alliages d'aluminium. Les causes de l'apparition de certains défauts et leurs conséquences montrent qu'il existe un très grand nombre de paramètres qui affectent les caractéristiques des pièces produites. Dans le cas de ces travaux de thèse, nous avons travaillé sur deux alliages d'aluminium : l'AlSi7Mg0,6, alliage de fonderie dont la faisabilité de sa mise en œuvre par SLM était déjà connue, et l'AM205, alliage haute résistance, au fort potentiel pour les applications aéronautiques et rarement étudié.

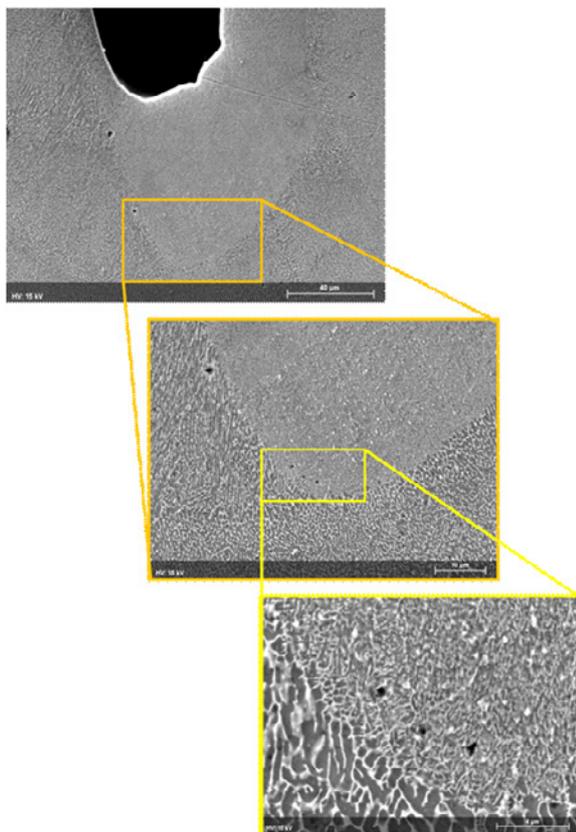
Pour optimiser le procédé, il est nécessaire de définir les caractéristiques matériaux à considérer. Les matériaux élaborés par SLM présentent des spécificités, tels que des états de surfaces irréguliers ou encore une microstructure très fine et multi-échelle (voir Figure 2). La présente thèse a été l'occasion de faire une analyse des moyens de caractérisation existants et disponibles pour choisir les plus adaptés à cette méthode de production. Ont ainsi été sélectionnées différentes techniques de caractérisation pour réaliser des analyses de la poudre initiale et des pièces finales (microanalyses, caractérisation de la porosité et des propriétés mécaniques). Le choix des méthodes s'est fait en prenant en compte à la fois les spécificités des matériaux issues du SLM (finesse de la microstructure obtenue, états de surface irréguliers, etc.), sans perdre de vue les besoins d'une applicabilité industrielle. A titre d'exemple, après comparaison

PRIX 3AF : METTRE EN ORDRE LE PRÉSENT POUR PERMETTRE L'AVENIR : L'EXEMPLE D'UNE THÈSE SUR LA FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE

de différentes méthodes de détermination de la densité relative des matériaux, on a choisi pour l'ensemble des travaux, la méthode de double pesée, ou méthode d'Archimède, car cette méthode est non destructive et permet d'obtenir une incertitude de mesure satisfaisante.



a – Vue au microscope optique



b – Vue au microscope électronique à balayage

Figure 2. Une organisation structurale multi-échelle

De nombreux facteurs peuvent avoir une influence sur la qualité finale des pièces fabriquées par SLM et ceci quel que soit le dispositif utilisé. Par exemple, les propriétés

de la poudre initiale impactent de façon conséquente la qualité d'une production. Ainsi, si la répartition granulométrique de la poudre n'est pas maîtrisée, les défauts d'écoulement de celle-ci au sein du moyen engendrent de nombreux problèmes (défaut d'étalement de la poudre sur la zone de construction, dépôt non homogène, etc.), pouvant avoir pour ultime conséquence une incapacité à produire la pièce désirée. Autre exemple, le flux d'argon, nécessaire pour éviter l'oxydation du matériau en cours de production, a aussi une influence sur les propriétés finales des pièces, notamment sur la densité relative de celles-ci (voir Figure 3).

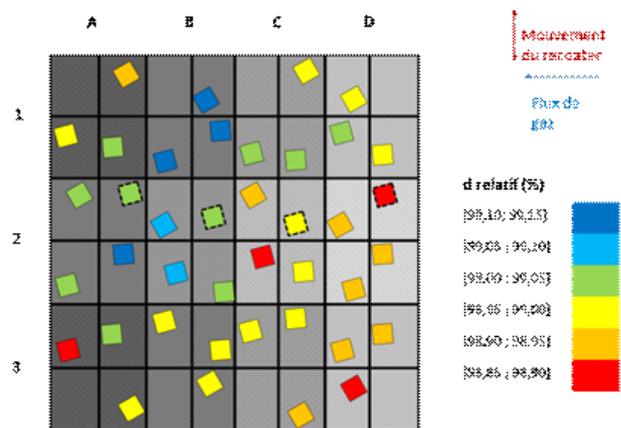


Figure 3. Cartographie des densités des échantillons suivant leur position sur le plateau de construction

La position des éprouvettes sur le plateau de construction a également une influence sur les propriétés finales des pièces produites (densité des pièces, propriétés de surface et propriétés mécaniques). C'est donc une étape de préparation d'une fabrication à ne surtout pas négliger. On a également pu mettre en évidence que la microstructure développée lors de l'élaboration d'une pièce par SLM est beaucoup plus fine que celle habituellement observée en fonderie par exemple. Elle témoigne de l'histoire thermique complexe que subit le matériau (voir Figure 4). Les propriétés finales des pièces y sont directement liées.

En résumé, l'ensemble des travaux réalisés au cours de cette thèse avait pour objectif de mettre en place une démarche pour l'étude de la faisabilité de la fabrication de pièces en alliages d'aluminium par le procédé SLM, en s'intéressant à l'ensemble de la chaîne de fabrication qui part de la caractérisation du matériau de base, la poudre, jusqu'à la caractérisation du matériau final, en

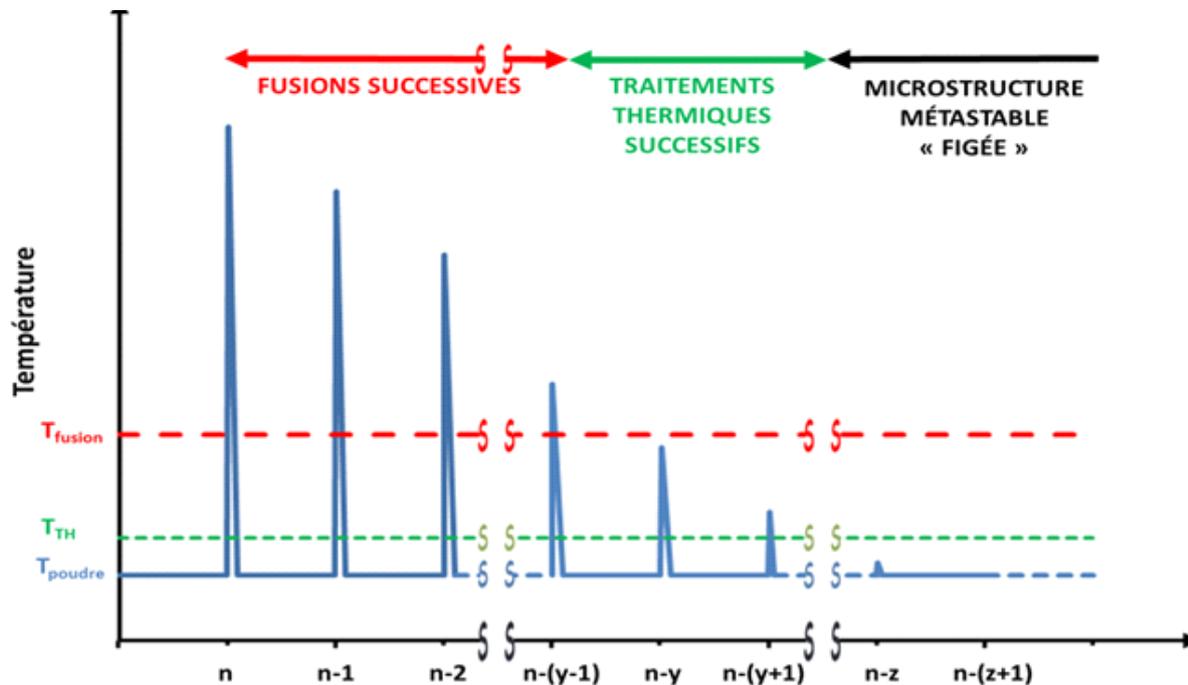


Figure 4. Cycle thermique subi par le matériau lors de la fusion d'une couche N de poudre

passant par la caractérisation du moyen de production. Les conditions opératoires sur ce type d'équipement sont multiples et bien évidemment des choix on dû être faits pour ce travail. Les générations de doctorants suivantes pourront facilement trouver de multiples pistes de recherche. Antoine de Saint-Exupéry disait : « L'avenir n'est jamais que du présent à mettre en ordre. Tu n'as pas à le prévoir, mais à le permettre ». Cela résume parfaitement le travail du doctorant qui osera partir à l'aventure, dans l'inconnu, pour permettre aux générations suivantes de vivre leur rêve scientifique et technologique.

Parce que faire de la recherche, c'est avant tout partager avec le plus grand nombre le résultat de son travail, rendez-vous est donné le 24 novembre prochain, à 18h, à la cité de l'Espace de Toulouse, pour une conférence intitulée *L'innovation technologique au service de l'aérospatial : exemple de la fabrication additive*.

Au plaisir de partager avec vous prochainement : cassiopee.galy@irt-saintexupery.com ■

MAIS QU'ALLONS-NOUS FAIRE LÀ-BAS ?

par Michel Viso, Expert exobiologie, exoplanètes et protection planétaire au CNES

MARS : POURQUOI TANT D'ATTENTION ?

Ah Mars ! Probablement une des premières planètes identifiées et certainement depuis le début de l'ère spatiale, la plus explorée. Une planète difficile ; plus de cinquante engins ont été lancés mais à peine une petite moitié a réussi à remplir les objectifs de la mission. Au-delà de la fascination que cette planète exerce sur l'imaginaire collectif, elle passionne aussi de larges communautés scientifiques. Ce sont elles qui alimentent l'ampleur des missions en cours ou en projet. En 2021, trois engins ont abordé la planète Mars. La mission *Hope*, un satellite placé sur une orbite martienne excentrique, fabriqué par les Emirats arabes unis, lancé par un lanceur japonais et équipé d'instruments fournis par différents pays. La mission *Tianwen 1*, lancée par la Chine emporte trois objets : un satellite d'étude de la planète et servant de relais radio pour les communications avec la Terre, un composite d'atterrissage qui déposera à la surface de Mars une plateforme scientifique d'où descendra un véhicule lui aussi équipé d'instruments d'analyse. Enfin la mission Mars2020, qui a déposé avec élégance, le 18 février 2021, le véhicule *Perseverance* dans le cratère Jezero

Ah Mars ! Pourquoi donc tant d'attention ? Contrairement aux autres planètes du système solaire, Mars à probablement connu, il y a des milliards d'années, des conditions similaires à celles régnant, à cette même époque sur Terre : une atmosphère dense, de l'eau liquide et un champ magnétique à grande échelle ainsi que du volcanisme et des bombardements par des comètes et des météorites. Les scientifiques s'interrogent, c'est leur travail ! Et donc, si la vie s'est développée sur Terre à cette époque, une forme de vie aurait-elle pu se développer également sur Mars ? Et chacun d'étudier par tous les moyens possibles les roches, les sédiments ainsi que les paysages martiens. Ils portent en eux les explications de la disparition de l'atmosphère dense et donc de l'eau liquide ainsi probablement que des indications des phénomènes qui se sont produits à la surface de Mars quand elle était « habitable ». Toutes les missions à destination de Mars apportent des pièces nouvelles à ces interrogations. Cependant nous allons nous concentrer sur les objectifs et les tâches dévolues à la mission Mars 2020 et au véhicule *Perseverance* qui vient de commencer des opérations à la surface de Mars.

LA MISSION MARS2020 : LE ROVER PERSEVERANCE

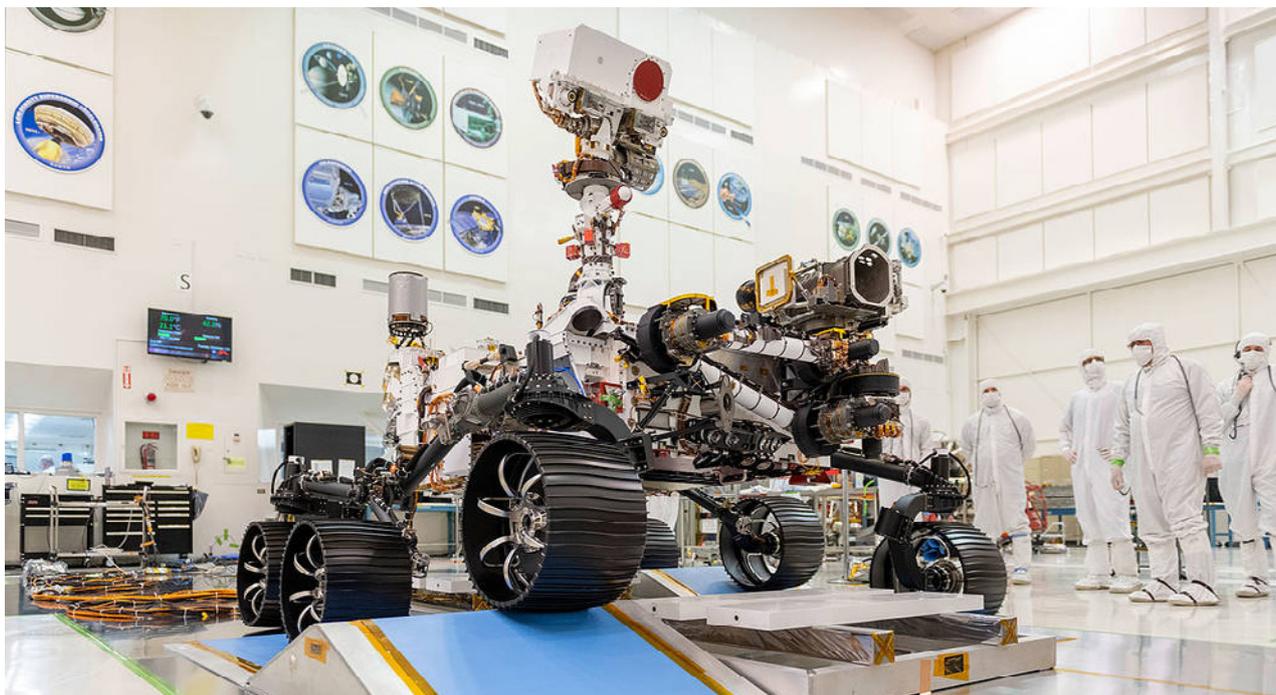
Ah *Perseverance* ! Quel engin : 1050 kg de génie avec 6 roues, un mât, un bras, une pile nucléaire (*Radioisotopic Thermo-electric Generator*). Et en plus 7 instruments scientifiques, une expérience d'extraction de l'oxygène à partir du gaz carbonique et un petit hélicoptère. Cet ensemble doit remplir les 3 objectifs principaux qui ont été assignés à la mission. Le premier est d'explorer des environnements anciens de la planète Mars afin de déchiffrer son histoire géologique et mieux caractériser son habitabilité passée. Le second sera de rechercher des traces de vie ancienne en détectant des bio-signatures éventuelles sur les sites géologiques sélectionnés. Enfin le dernier prépare l'exploration humaine de Mars en testant des technologies, en précisant les conditions qui règnent à la surface de la planète et en améliorant la connaissance des conditions de rentrée atmosphérique.



Logo de la mission Mars 2020

LES BIO-SIGNATURES

Ah les bio-signatures ! De quoi s'agit-il ? Une bio-signature est un objet, une substance ou une structure observée *in situ* ou sur un échantillon qui, avec nos connaissances actuelles, ne peut avoir été engendrée que par un processus tellement complexe que seule une forme de vie pourrait en être à l'origine. Si des formes de vie microbiennes sont apparues sur Mars, elles ont pu laisser des traces de leur présence, ou « bio-signatures », sur le sol martien et dans l'histoire de ses roches. Une clé de 12 ou une paire de Lunettes seraient considérées comme des bio-signatures anthropogéniques, quand bien même ces objets ne contiendraient ni carbone, ni acides aminés. On estime cependant avoir peu de chance de les trouver sur Mars !!! Moins improbables, des molécules complexes comme, par exemple, des dérivés du cholestérol seraient elles considérées comme des bio-signatures chimiques. Des formes moléculaires particulières, des assemblages improbables spontanément, des singularités dans la répartition des isotopes, en seraient aussi autant. Des formes géologiques, comme des stromatolithes, des



Perseverance en test de mobilité dans la salle blanche du JPL - crédit NASA

crystallisations particulières seraient des bio-signatures morphologiques. *Perseverance* pourra détecter certaines bio-signatures éventuelles mais, malgré leur sophistication, les instruments ne peuvent pas être aussi performants que les instruments scientifiques disponibles dans les laboratoires terrestres. Mars 2020 est la première étape du retour d'échantillons martiens sur Terre.

LES ÉCHANTILLONS

Ah les échantillons ! Tous les biologistes, géologues et statisticiens vous le diront : un résultat n'a de sens que si l'échantillon est excellent. *Perseverance* peut récolter une quarantaine d'échantillons et presque tous les instruments seront utilisés pour sélectionner les meilleurs endroits où se diriger, le meilleur endroit à prélever, le meilleur échantillon à conserver ou à rapporter. Ces échantillons seront d'autant plus pertinents que les formations géologiques dont ils sont issus seront documentées, décrites, étudiées. Toute la charge utile y contribuera mais **SuperCam**, notre instrument américano-français, jouera un rôle essentiel dans tous ces processus.

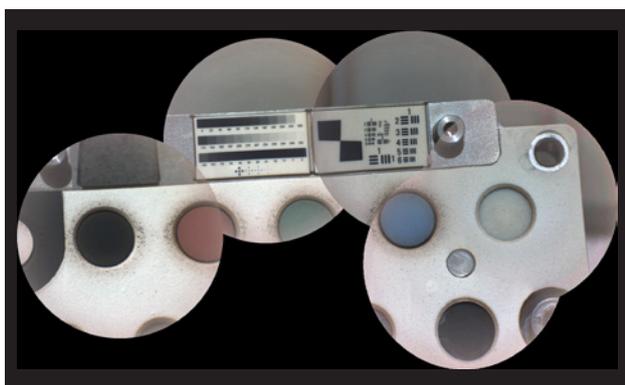
Revenons un peu en arrière ! Pour chaque mission, la sélection du site d'atterrissage donne lieu à d'âpres discussions entre les équipes scientifiques. Il doit non seulement convenir aux différents chercheurs, mais aussi

aux ingénieurs et aux contrôleurs en charge du véhicule qui va se poser. La zone bien précise du cratère Jézéro, de 7,7 km sur 7,6 km (46 km²), un peu moins de la moitié de la surface de Paris, représente le meilleur compromis entre toutes ces contraintes. Nous y sommes ! Le travail va commencer après une période de tests et de vérifications qui dure au moins 90 jours ; la « recette en vol » en jargon spatial.

SUPERCAM VA JOUER UN RÔLE ESSENTIEL

Dans cette aventure scientifique, l'instrument américano-français SuperCam va jouer un rôle essentiel. Il fait beaucoup avec ses spectromètres, sa caméra et son micro. SuperCam décrit parfois comme le couteau suisse de la mission succède à ChemCam qui travaille sur Mars depuis le 6 août 2012 à bord de *Curiosity*. Ces instruments sont le fruit d'une coopération nouée entre Roger Wiens du Laboratoire national de Los Alamos (LANL) aux États-Unis et Sylvestre Maurice de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse (IRAP), alors qu'ils étaient post-doctorants. L'idée s'est construite au coin d'une table, puis ils ont chacun progressé professionnellement en la faisant mûrir au point de rédiger en commun une réponse aux appels à proposition d'instrument de la NASA. Le dossier est copieux, détaillé, descriptif jusque dans les moindres détails ; c'est un travail qui mobilise déjà les équipes techniques et scientifiques qui contribueront si l'ins-

trument est sélectionné. Il faut que la proposition soit scientifiquement justifiée, techniquement faisable dans le temps imparti et que l'organisation la rende crédible. Il faut ensuite que les organismes de tutelle et notamment le CNES et le CNRS (pour la France) s'engagent à en assurer le financement et à en garantir le bon achèvement. *In fine*, en juillet 2014, SuperCam a été sélectionné avec 6 autres instruments, parmi 85 propositions instrumentales. Dans le détail SuperCam rassemble en fait cinq systèmes, cinq capteurs, qui se complètent.



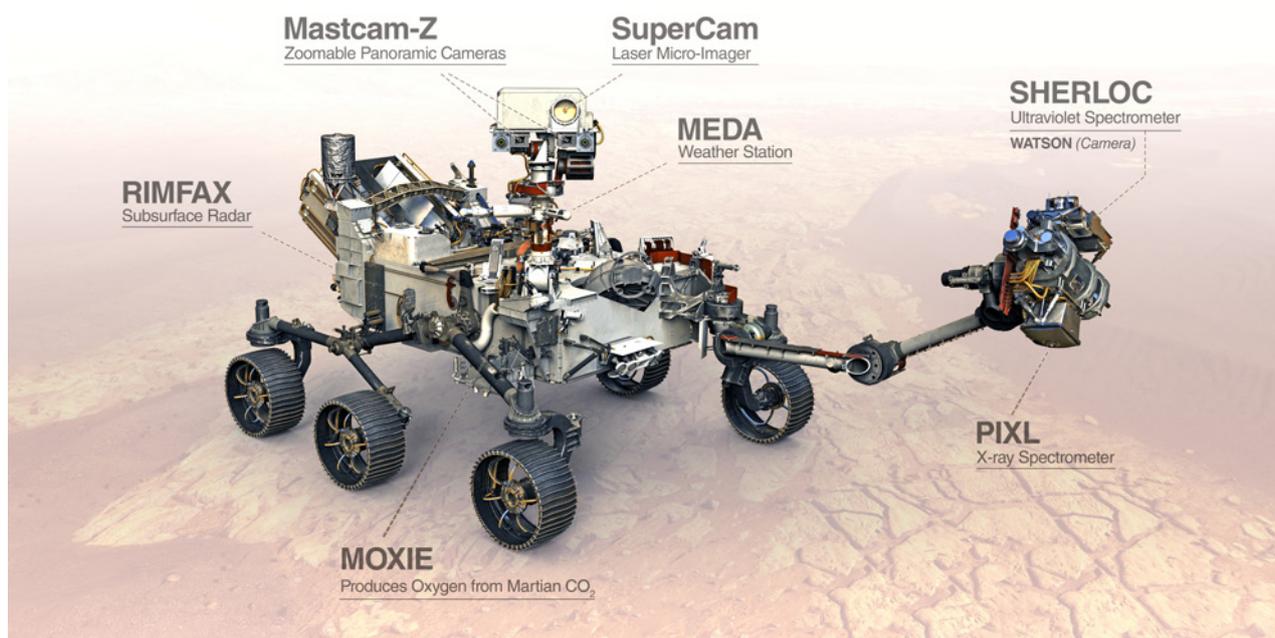
Mosaïque de Photos des cibles de calibration de Supecam. Photos prise avec la caméra Remote Micro-Imager (RMI) de Supercam sur Mars. –crédit NASA

LE SPECTROMÈTRE LIBS

Tout d'abord, le spectromètre LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*), qui utilise un faisceau laser infrarouge (1064 nm) pour vaporiser quelques microgrammes de roche. Le faisceau est si puissant qu'il désorganise les électrons des éléments chimiques qui se trouvent dans ce plasma. En revenant à leur état initial, ils produisent de la lumière ; une étincelle. C'est la lumière de cette étincelle, principalement dans les longueurs d'onde de l'ultraviolet, qui est analysée et donne accès à la composition en éléments chimiques des roches. C'est à l'IRAP que la version spatiale de ce système a été mise au point. La branche optronique de Thales est à l'origine du laser compact, fiable et puissant qu'elle développe dans le cadre d'un contrat passé avec le CNES.

LA SPECTROMÉTRIE RAMAN

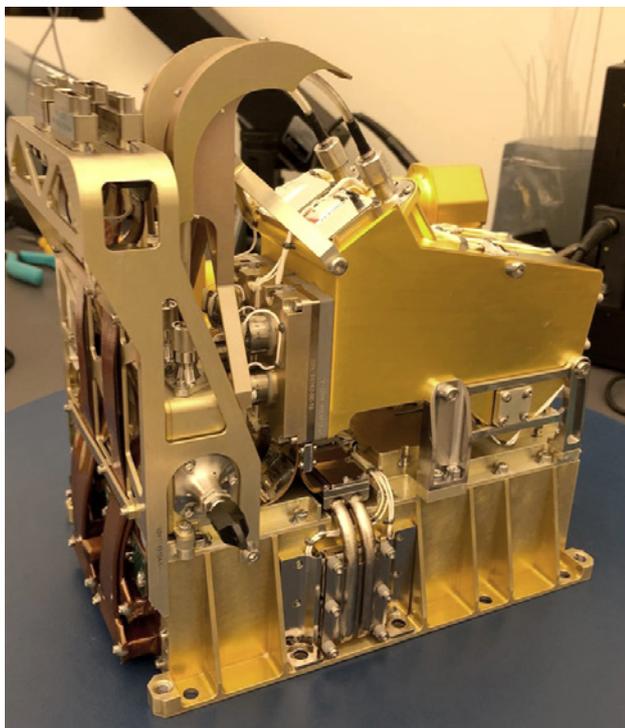
Grâce à un système particulier il est possible de diviser par deux la longueur d'onde du laser (532 nm) et de l'utiliser pour faire un autre type de spectrométrie : la spectrométrie Raman. Le faisceau laser émis dans le vert est réfléchi par la cible. Cependant une partie du faisceau est modifiée par la manière dont les atomes



Les sept instruments scientifiques de Perseverance –crédit NASA

sont organisés en molécules et les molécules liées entre elles. Ce sont ces modifications qui génèrent un spectre caractéristique de la composition minéralogique de la cible. Cette information est portée par un photon sur un million... l'interprétation est délicate et mobilise des expertises très spécialisées en particulier celle d'Olivier Beyssac de l'Université Pierre-et-Marie-Curie de Paris.

Ces deux fonctions qui sont liées à l'émission du faisceau lumineux du laser sont actives jusqu'à une distance de quelques mètres. Pour ces deux instruments, l'équipe française est en charge du laser et de la partie optique en haut du mat, l'équipe américaine est en charge des spectromètres placés avec l'électronique de contrôle de tout l'instrument dans le corps du véhicule.



Ensemble des spectromètres fabriqués par le LANL placé dans le corps de Perseverance – crédit NASA

LE SPECTROMÈTRE INFRAROUGE

Le spectromètre infrarouge analyse la lumière du soleil réfléctée par les surfaces. Il est entièrement fabriqué par le LESIA, un des laboratoires français participant au projet avec une contribution de l'IAS. Le spectre obtenu est caractéristique de la composition minéralogique de la cible de proximité ou des formations géologiques plus éloignées. Ici encore des spécialistes comme ceux de l'équipe de Thierry Fouchet interviennent pour les interpréter.



Ensemble optique de Supercam, contribution Française, en cours d'assemblage à l'IRAP. crédit IRAP

LA CAMÉRA COULEUR

Pour être capable de placer toutes ces observations très précises dans un contexte géologique, SuperCam bénéficiera des images obtenues par les multiples caméras de Perseverance. Il y en a 23 au total. Cependant la caméra couleur de SuperCam est vraiment destinée à soutenir les applications de l'instrument. Elle emprunte le même chemin optique que le laser, a un facteur d'agrandissement important et une haute résolution spatiale. À cinq mètres elle distingue des détails d'un demi-millimètre.

LE MICROPHONE

Enfin, SuperCam embarque également, à l'initiative de David Mimoun de l'ISAE-SUPAERO, le tout premier microphone scientifique qui enregistrera des sons à la surface de Mars. Il captera les sons émis par l'impact du laser en mode LIBS afin d'analyser la dureté et la porosité des roches. Il étudiera aussi le bruit du vent et donnera des indications sur la météorologie de la planète rouge. Il captera aussi certains sons des mécanismes du véhicule lors de leur fonctionnement. Un autre microphone du Jet Propulsion Laboratory (JPL – NASA) fixé sur le châssis du véhicule enregistrera aussi les bruits techniques générés par les opérations.

PAMI LES PROUESSES DU PROJET SUPERCAM

Une des prouesses de SuperCam a été de rassembler la partie optique du LIBS et du Raman ainsi que les trois autres instruments dans un volume identique à celui de l'instrument précédent et avec une allocation de masse quasiment identique. Des équipes d'ingénieurs du LAB (autour de Philippe Caïs) et du LESIA (autour de Pernelle Bernardi) sont venus renforcer les équipes de l'IRAP, de l'ISAE-SUPAERO et du CNES.



Ensemble optique de Supercam, contribution Française, avant son intégration aux USA - crédit NASA

Une autre prouesse a été de faire face à un incident de développement grave qui s'est traduit, quelque mois avant sa livraison au LANL, par la destruction, lors de la panne d'une étuve, de la partie mécanique et optique du modèle de vol du « Mast Unit ». Ça arrive !!!

Après quelques heures de sidération, « que pouvons-nous faire pour être prêts à temps ? » est la seule question qui a émergé.

Les laboratoires, le CNRS, l'université de Toulouse, le CNES avec un soutien sans faille du JPL et de la NASA ont mis en place une « Rescue team ». En moins de 7 mois il a fallu réapprovisionner des éléments optiques, refabriquer des éléments mécaniques ou électroniques, les qualifier, les assembler et les tester. Bien sûr il a fallu renforcer l'équipe d'ingénieurs déjà en place par de nouveaux talents. Au prix d'une réorganisation du calendrier d'intégration de *Perseverance* par le JPL et le LANL, le SuperCam nouveau a pu être intégré à temps sur le véhicule et passer avec succès les tests de réception.

PENDANT TROIS ANS SUPERCAM VA JOUER UN RÔLE ESSENTIEL DANS L'ANALYSE DU SOL DE MARS

Lancé le 30 juillet 2020, arrivé le 18 février 2021 à la surface de Mars, le véhicule *Perseverance* va commencer sa mission scientifique et de recueil d'échantillons de sol et de roche. Pendant les 3 ans de la mission initiale, SuperCam va jouer un rôle essentiel dans ces opérations. L'instrument est opéré en alternance par l'équipe américaine et l'équipe française ; une semaine chacun. Après la période de 90 sols (le sol est le jour martien, légèrement plus long que le jour terrestre), les opérations ne se feront plus en horaires martiens mais en horaires californiens. Lorsque c'est le tour des français, c'est à partir du centre spatial

de Toulouse que les scientifiques et les ingénieurs en relation avec leurs collègues américains ou d'autres pays choisissent les activités à faire. En heures françaises ils commencent vers 17 ou 18 heures, reçoivent les données recueillies pendant la journée martienne et les analysent. Par discussions à travers plusieurs téléconférences ils établissent par consensus les actions à mener et enfin programment l'instrument dont ils ont la responsabilité. Le programme, contrôlé deux fois à Toulouse, est envoyé au JPL qui vérifie qu'il obéit bien aux « règles de vol ». Il est 3 heures du matin ! Cela fait, le JPL l'intègre dans le programme d'activité du jour qui est envoyé à *Perseverance* directement par le réseau de grande antenne de la NASA « DSN-Deep-Space Network ». Le lendemain ça recommence. Pour ChemCam, ça fait maintenant 9 ans que cela se poursuit...

Nous y sommes !! À travers cet instrument c'est toute la communauté française qui participe avec le CNES, le CNRS, les universités à l'exploration martienne. Grâce à SuperCam, la France et l'Europe ont déjà un pied dans le retour d'échantillons. Nos contributions seront importantes pour les prochaines étapes à travers le partenariat noué entre l'ESA et la NASA. Il nous faut maintenant nous préparer à recevoir les échantillons martiens sur Terre, aux USA en premier lieu, certes, mais aussi en Europe...

Sigles et acronymes :

- IAS : Institut d'Astrophysique Spatiale (Orsay)
- IRAP : Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Toulouse)
- JPL : Jet Propulsion Laboratory (NASA) – California Institute of Technology – Pasadena (CAL)
- LAB : Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux
- LANL : Los Alamos National Laboratory
- LESIA : Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (Meudon)
- LIBS : Laser Induced Breakdown Spectroscopy ■

CONTRIBUTION DE DEDALOS À LA PROPULSION ÉLECTRIQUE DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

par Konstantinos Katsonis, CEO de DEDALOS



De 1969 à 1976, Konstantinos Katsonis est ingénieur en physique du plasma et de la fusion contrôlée à EURATOM-CEA à Fontenay-aux-Roses (France). Il obtient en 1976 un diplôme de docteur d'État de l'université Paris-Sud. De 1977 à 1984, il rejoint l'International Atomic Energy Agency (IAEA) à Vienne (Autriche), où il travaille au sein de la section données nucléaires, unité données atomiques et moléculaires. De retour en France en 1984, il est ingénieur de recherche au CNRS à Orsay jusqu'en 2014, année où il fonde DEDALOS Ltd, *Data Evaluation and Diagnostics ALgorithms Of Systems*.

DEDALOS est une petite PME installée au nord de la Grèce, à Thessalonique (Vas. Olgas 128, 54645 Thessaloniki) qui se spécialise en modélisation et diagnostic des plasmas de laboratoire, mais aussi industriels et naturels. Une partie essentielle de ce travail est consacrée aux applications et au développement de différents types de propulseurs électriques, très importants pour la technologie de l'espace.

Les propulseurs électriques sont des moteurs qui utilisent comme matière propulsive différents atomes, molécules ou leurs mélanges dispensés par l'unité MFC (*Mass Flow Controller*) et qui tirent leur énergie de fonctionnement de la puissance électrique provenant de l'unité PPU (*Power Processing Unit*) associée. Cette dernière peut générer des champs électromagnétiques qui créent des plasmas constitués à base de la matière propulsive. Le plus souvent les PPU sont alimentées par l'énergie solaire, plus ou moins disponible dans notre Système solaire.

La société DEDALOS s'intéresse à la propulsion basée sur des matières propulsives traditionnelles comme le xénon, l'argon ou autres gaz rares et aussi le césium ou l'indium. Elle étudie également les possibilités de matières propulsives prometteuses comme l'iode. Toutefois, elle suit de près le développement récent de la technologie ISRU (*In Situ Resource Utilization*) basée sur l'utilisation comme matière propulsive de substances disponibles dans l'environnement où le propulseur électrique fonctionne, le plus souvent tirées de l'atmosphère de planètes ou de leurs satellites. De cette façon, le réservoir de matière propulsive peut être très réduit ou devient même totalement inutile, ce qui permet le très avantageux affranchissement du transport de la matière première

Un problème essentiel de la technologie ISRU est qu'il faut développer un modèle du propulseur satisfaisant pour le décrire et pour suivre son fonctionnement. Par conséquent, DEDALOS, qui a pu développer un type de modélisation globale du plasma des propulseurs électriques pour des matières propulsives traditionnelles comme le xénon, l'argon ou autres gaz rares et l'indium connu sous le nom de DGM (*Detailed Global Model*), a pu appliquer cette modélisation aussi à des matières propulsives relatives à la technologies ISRU les plus présentes dans notre Système solaire. Les plus importantes parmi elles sont les restes atmosphériques de la Terre rencontrés dans des altitudes d'environ 180 km à 240 km. Ces restes se composent essentiellement d'un mélange d'oxygène atomique et d'azote moléculaire. Une autre matière propulsive importante pour la technologie ISRU est le dioxyde de carbone, qui est notamment la composante majoritaire des atmosphères de Mars et de Vénus. Notons que les planètes extérieures de notre Système solaire sont essentiellement constituées d'hydrogène et de différents pourcentages d'hélium ; c'est pourquoi ces mélanges sont aussi importants pour la technologie ISRU.

En ce qui concerne la technologie DGM, elle constitue un outil analytique applicable en général à des plasmas naturels mais aussi à des dispositifs fonctionnant à base de plasma. C'est pourquoi nous avons utilisé cette modélisation comme support des réacteurs à plasmas ainsi que des propulseurs électriques, visant la caractérisation et le contrôle du plasma présent et aussi son diagnostic. Cette technologie conduit à des outils pour l'analyse du plasma et pour la conception et le fonctionnement des propulseurs, dont les trois principaux sont :

CONTRIBUTION DE DEDALOS À LA PROPULSION ÉLECTRIQUE DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

1. Des diagrammes donnant la composition des composantes du plasma (PCC), qui permettent l'évaluation de leurs densités ainsi que de la densité électronique et de la température du plasma. Évidemment, les résultats dépendent de la quantité de la matière propulsive fournie, de la puissance électrique absorbée ainsi que de la pression.

2. Des diagrammes de fonctionnement (FD) donnant le pourcentage d'ionisation des différents composants du plasma suivant des courbes isothermes et aussi de puissance absorbée constante. Le niveau d'ionisation, qui dépend essentiellement de la pression totale et de la puissance absorbée, est très important pour le propulseur, puisque ce sont uniquement les composantes ionisées qui sont accélérées. Un tel diagramme est montré Figure 1 où on peut voir des courbes isothermes (T_e constantes, en orange) et des courbes de puissance absorbée constantes (P_{abs} , en violet), donnant le pourcentage d'ionisation en fonction de la pression du plasma contenu dans le propulseur.

3. Les intensités absolues théoriques des raies spectrales du plasma attendues. La comparaison de ces intensités à des intensités expérimentales obtenues par spectroscopie d'émission permet de mettre au point un dispositif de diagnostic connu sous le nom de spectroscopie optique d'émission (OES). L'avantage de ce type de diagnostic est qu'il évite de perturber le plasma, comme c'est le cas avec des sondes.

Il est à noter que la modélisation DGM s'adapte à la géométrie de la chambre de décharge, à la constitution du plasma et aux nécessités industrielles inhérentes. DEDALOS a spécifiquement développé différents modèles du type DGM pour des propulseurs électriques envisagés pour les besoins des satellites évoluant autour de différents corps stellaires de notre Système solaire pour la télécommunication et l'observation ainsi que pour la propulsion nécessaire pour des missions envisagées dans différentes régions. La technologie ISRU est prise principalement en charge. Ainsi la société a développé le modèle 4CDGM pour des atmosphères consistantes de mélanges de N_2 , N, O_2 et O comme celle de la Terre, ainsi que le modèle CO_2 DGM pour des atmosphères composées essentiellement de CO_2 comme c'est le cas de Mars et de Vénus. Pour des planètes extérieures a été développé le modèle HHeDGM, supportant la modélisation de propulseurs fonctionnant près des corps stellaires gelés qui ont des ressources de mélanges hydrogène - hélium. Ces modèles ont permis d'obtenir une vue globale des possibilités de la technologie ISRU, ainsi que la caractérisation théorique et le développement des propulseurs électriques correspondants. Par ailleurs, les bases du diagnostic optique y afférant ont été obtenues.

Les travaux de DEDALOS et des collaborations ont abouti à la réalisation de nombreux projets dans le cadre de la Communauté européenne et de l'Agence spatiale européenne. Leur description serait trop longue, mais on peut en avoir une idée par un bref parcours des publications en références.

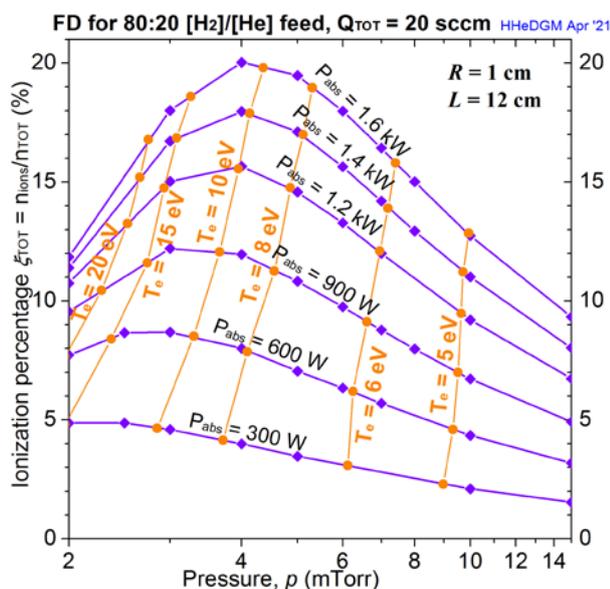


Figure 1. Diagramme de fonctionnement pour un propulseur électrique alimenté par un mélange H₂ / He

Dans le cadre du projet Européen AETHER, dirigé par la société Italienne Sitael, la société collabore actuellement à l'élaboration d'un propulseur électrique pour des vols spatiaux (voir Figure 2). Ses applications à des vols de très basse altitude constituent une grande opportunité ainsi qu'un défi. En effet, en même temps qu'un large spectre de scénarios pour missions scientifiques, gouvernementales et commerciales qui paraissaient jusqu'alors impossibles peut être réalisé, le freinage dû à l'atmosphère résiduelle à des altitudes au dessus de 250 km impose de sévères limitations à la durée de ces missions. Ce freinage doit être compensé continuellement par une poussée de façon à éviter la chute prématurée des satellites et assurer le vol des vaisseaux spatiaux, ce qui nécessite une trop grande quantité de matière propulsive embarquée. En utilisant les restes de l'atmosphère suivant une technologie ISRU, la propulsion électrique avec aspiration de l'air environnant permet de s'affranchir du transport de matière propulsive, d'où un allongement du

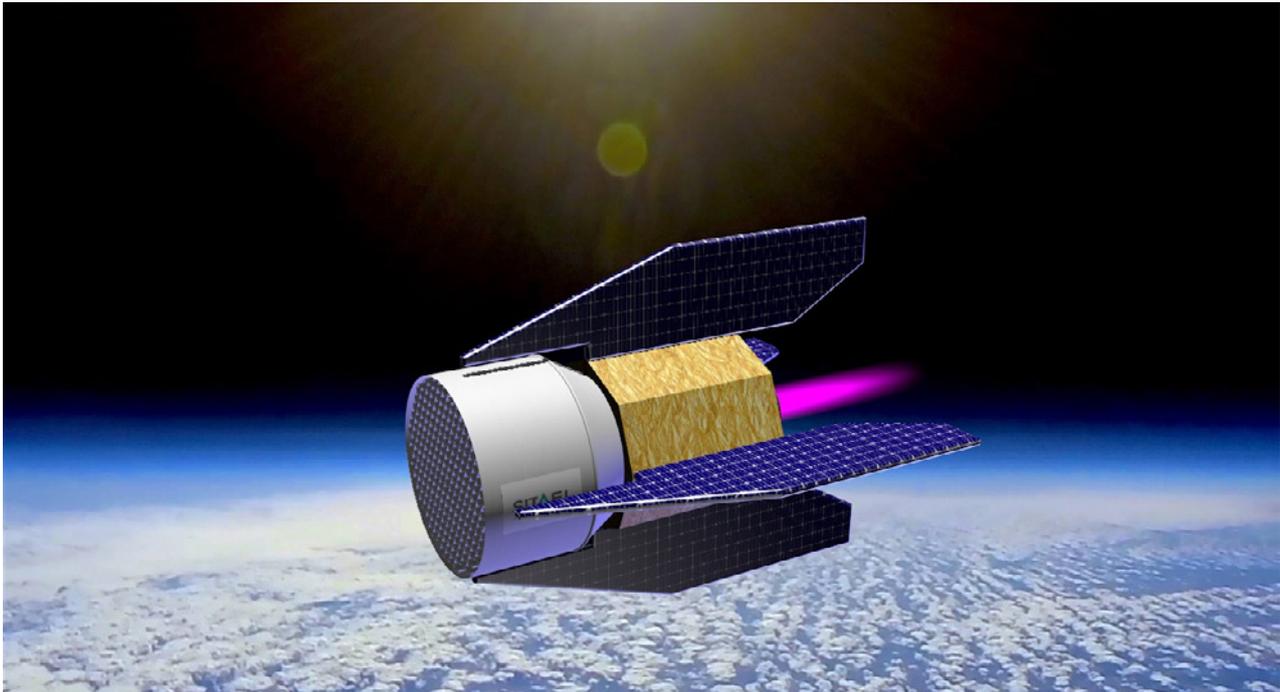


Figure 2. Image d'artiste du propulseur faisant l'objet du projet AETHER

temps de fonctionnement et une économie substantielle. Récemment, Sitael a développé "RAM-EP", le premier prototype de propulseur à "air-breathing", arrivant à un niveau TRL 4. AETHER vise à accéder à un niveau plus avancé, avec démonstration expérimentale d'une poussée suffisante pour les applications envisagées.

Six États membres sont impliqués dans AETHER, avec comme partenaires Sitael (Italie, coordinateur), l'Institut Von Karman (Belgique), l'université de Surrey (Royaume-Uni), DEDALOS (Grèce), Transmit (Allemagne), Astos (Allemagne) et RHP Technology (Autriche), assurant un mélange des connaissances et expertises nécessaires pour amener le projet à bon terme. Le projet a commencé début décembre 2019 et sera terminé après 30 mois en mai 2022. AETHER a reçu un financement par le programme Horizon 2020 de recherche et innovation sous convention de subvention No. 870436.

DEDALOS s'occupe aussi en ce moment de la modélisation et du diagnostic d'un propulseur électrique du type ISRU, destiné à des missions dans la région de Neptune.

Références

Ch. Berenguer, K. Katsonis, J. Gonzalez Del Amo (2021). *Spacecraft Propulsion with ISRU Near Mars and Venus, Based on CO2 Propellant*, 7th Space Propulsion 2020+1 Conference, SP2020_016, Estoril, Portugal, March 2021
 K. Katsonis, Ch. Berenguer, J. Gonzalez Del Amo (2021).

Using of Iodine as Propellant in Electric Thrusters, 7th Space Propulsion 2020+1 Conference, SP2020_017, Estoril, Portugal, March 2021

Ch. Berenguer, K. Katsonis (2021). *Evaluation of Earth Atmosphere Remnants Used as Propellant in Electric Thruster Technology*, 7th Space Propulsion 2020+1 Conference, SP2020_018, Estoril, Portugal, March 2021

K. Katsonis, Ch. Berenguer, L. Walpot, J. Gonzalez Del Amo (2021). *A Detailed Global Model of Hydrogen / Helium in Support of Neptune Study*, 7th Space Propulsion 2020+1 Conference, SP2020_384, Estoril, Portugal, March 2021

K. Katsonis, Ch. Berenguer, G. Cesaretti (2020). *ISRU Technology Propulsion for Missions in the Solar System*, 1st Aerospace Europe Conference 2020, AEC2020_523, Bordeaux, France, 25 to 28 February 4

Ch. Berenguer, K. Katsonis, J. Gonzalez del Amo (2020). *CO2 Based ISRU Propulsion for Satellites and Spacecrafts in the Vicinity of Mars*, 1st Aerospace Europe Conference 2020, AEC2020_525, Bordeaux, France, 25 to 28 February

Ch. Berenguer, K. Katsonis (2018). *Characterization and Optical Diagnostics of Air – Breathing Electric Thrusters by 4CDGM*, Electric Propulsion Innovation and Competitiveness (EPIC) 2018 Workshop, London, UK, October 2018

K. Katsonis, Ch. Berenguer, D. Pavarin, F. Trezzolani et al. (2019). *Modeling and Optical Diagnostics of Iodine Fed Helicon Type Thrusters by a Detailed Global Model (DGM)*, 36th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2019-448, Vienna, Austria, Sept. 2019

LE COMMANDEMENT DE L'ESPACE

« AsterX 2021 » : Le premier exercice spatial militaire en Europe

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



Le 8 mars 2021 a marqué le lancement du premier exercice spatial en Europe : « AsterX 2021 ». Piloté par le Commandement de l'espace (CDE), cet exercice tactique d'entraînement aux opérations spatiales militaires du 8 au 12 mars au Centre de Toulouse du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales).

« Le commandement de l'espace est un organisme à vocation interarmées.



- Création : 2019
- Organisme interarmées
- Ancienne dénomination : Commandement interarmées de l'espace
- Effectif : 220
- Commandant : général Michel Friedling

Le Commandement de l'espace est un organisme à vocation interarmées. Il est commandé par un officier général qui prend le titre de commandant de l'espace. Il reçoit des directives fonctionnelles du chef d'état-major des Armées. Le chef d'état-major de l'Armée de l'air et de l'espace en exerce le commandement organique.

Un an après sa création, le CDE a été en mesure d'organiser un exercice très complet autour de la surveillance de l'espace, montrant le haut niveau de technicité de l'armée de l'Air et de l'Espace.

Sa montée en puissance se caractérise par son installation progressive au Centre Spatial de Toulouse. Avant d'être achevée en 2025, cette installation vise à gagner en expertise dans le contrôle des satellites et la conduite d'opérations spatiales militaires et en outre de réussir la concentration et la visibilité de ce nouveau grand commandement de l'armée de l'Air et de l'Espace, dont les effectifs s'élèveront à près de 500 personnes à terme.

« *Vous êtes des combattants du spatial* » : c'est en ces termes que le colonel Christophe Michel, directeur de l'exercice « AsterX 2021 » avait terminé le discours d'ouverture qu'il avait adressé à la soixantaine de participants, opérateurs spatiaux prêts à démarrer leur entraînement et membres de l'équipe d'animation, de planification et de soutien.

LES TROIS UNITÉS OPERATIONNELLES DU COMMANDEMENT DE L'ESPACE ONT PARTICIPÉ

Les trois unités opérationnelles du Commandement de l'espace (CDE) ont participé à l'exercice :

- Le Centre de Commandement et de Contrôle des Opérations Spatiales (C3OS) de Paris (Balard) ;
- Le Centre Militaire d'Observation par Satellites (CMOS) de Creil ;
- Le Centre Opérationnel de Surveillance Militaire des Objets Spatiaux (COSMOS) de Lyon.

Ces trois unités ont travaillé en plateau en étroite collaboration avec le CNES, l'industrie et les partenaires allemands et américains.

UNE ARCHITECTURE DE SIMULATION

Une architecture de simulation a été imaginée, représentant à l'identique les systèmes « métier » utilisés couramment par les opérateurs. Le simulateur réalisé allie une base de données composée de quelque 10 000 objets spatiaux, 5 applicatifs opérationnels, la

DÉFENSE LE COMMANDEMENT DE L'ESPACE

génération de 18 événements spatiaux et une gestion du temps permettant de compresser 4 semaines réelles d'opérations en 4 jours d'entraînement. Réunis dans une même salle d'opérations, les participants étaient alors confrontés à des situations complexes et réalistes.

Au cours de la semaine, le scénario « AsterX » s'est intensifié : au milieu de l'océan Atlantique, sur un continent fictif, une crise géopolitique a progressivement pris de l'ampleur entre deux régions. L'une d'elles était soutenue par la France et ses alliés. Les unités du CDE se mobilisèrent avec leurs partenaires pour surveiller l'activité et répondre aux possibles attaques spatiales. Cette crise entre deux régions a été alimentée tout au long de la semaine, l'objectif étant de balayer toutes les hypothèses d'événements spatiaux. Les opérateurs ont dû faire face par exemple à des tirs d'armes anti-satellites ou à des rendez-vous dans l'espace ou même à des phénomènes météorologiques solaires.



Un scénario complexe dans lequel les enjeux de maîtrise de l'espace sont prédominants.

12 MARS 2021 : LE PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE RENCONTRE LES COMBATTANTS DU SPATIAL

Le président de la République Emmanuel Macron est venu au Centre de Toulouse du CNES pour rencontrer les aviateurs du commandement de l'espace (CDE) qui participaient à « AsterX ».

En plein cœur de la salle des opérations, il a longuement échangé avec les aviateurs du C3OS, du CMOS et du COSMOS.

Au cours de cette visite, le président de la République était accompagné de Madame la ministre des Armées Florence Parly, du général François Lecointre, chef d'état-major des Armées (CEMA), du général Philippe

Lavigne, chef d'état-major de l'armée de l'Air et de l'Espace (CEMAAE) et du général Michel Friedling, commandant le Commandement de l'espace (CDE).



Le Président de la République au sein de la salle des opérations du CNES

Le général Philippe Lavigne a notamment déclaré en conclusion :

« L'exercice AsterX a démontré une crédibilité opérationnelle qui repose sur une préparation de haut niveau.

« L'exercice AsterX s'inscrit pleinement dans la montée en puissance du spatial de défense. Un domaine aux enjeux multiples et aux évolutions incessantes auxquels il faut faire face. Le CDE a dévoilé la place stratégique qu'il occupe dans ce domaine au cœur des priorités de l'armée de l'Air et de l'Espace. Un commandement de l'espace dynamique et créatif sur tous les fronts. »

LE CENTRE MILITAIRE D'OBSERVATION PAR SATELLITES (CMOS)

Situé principalement sur la base aérienne 110 de Creil, le CMOS a pour mission de garantir l'accès permanent du ministère des Armées à l'imagerie spatiale : un cœur de réseau métropolitain et une quarantaine de stations fixes ou déployables répondent aux besoins des entités, en Métropole, à l'Outre-Mer ou sur les théâtres, tant pour l'accès aux archives que pour la programmation des systèmes satellitaires. Le CMOS vérifie également la qualité des images livrées.

Le CMOS voit le renouvellement de ses capacités : après la mise en orbite de CSO-1 le 19 décembre 2018 et le lancement de CSO-2 le 29 décembre 2020 (voir page 5), CSO-3 suivra dans quelques mois.

Près de 110 000 images ont été acquises en 2019, dont plus de la moitié issue de CSO-1.

LE CDE À TOULOUSE

Présent également au Centre spatial toulousain du CNES depuis l'été 2019, le CDE a développé son expertise sur le maintien à poste des satellites en orbites basses. Depuis la publication de la stratégie spatiale en juillet 2019, le périmètre des fonctions de ses officiers évolue, en relation avec le CNES, afin d'acquérir les compétences indispensables pour devenir opérateurs spatiaux et conduire des actions dans l'espace.

Le lancement de CERES, première capacité française de collecte de renseignement d'origine électromagnétique (ROEM) depuis l'espace, héritière d'une lignée de démonstrateurs technologiques aura lieu cette année.



Les trois satellites de la constellation Ceres

LE CENTRE OPÉRATIONNEL DE SURVEILLANCE MILITAIRE DES OBJETS SPATIAUX (COSMOS)

Le COSMOS, installé sur la base aérienne 942 de Lyon-Mont-Verdun a pour mission permanente de **surveiller l'espace**. Il établit la situation spatiale de manière autonome et il la valorise pour les opérations militaires et la sécurité des biens et des personnes.

Les systèmes électromagnétiques de veille « GRAVES » lui permettent de surveiller les objets spatiaux en orbite basse et d'évaluer la menace. Les données obtenues auprès du CNES et de AIRBUS Defence and Space permettent de surveiller l'arc géostationnaire.

Le COSMOS participe à la **planification des opérations** grâce en particulier aux prévisions géo-référencées et synchronisées de la qualité GPS. Il surveille l'activité du soleil pour être en mesure de réagir lors d'éruptions solaires à d'éventuelles perturbations des moyens de télécommunication, des plus basses fréquences jusqu'aux gammes GPS et radars, à la surface du globe

et dans l'espace. Une anticipation de la disponibilité des fréquences est établie en préparation des missions.

Le COSMOS participe à la fonction de **renseignement d'intérêt spatial** en capitalisant la connaissance des capacités spatiales étrangères et en surveillant les indices d'activité.

Le COSMOS est en **lien avec les alliés**. Il est en lien quotidien avec le partenaire américain dans le cadre de la surveillance de l'espace. Il produit également les données fournies dans le cadre européen de surveillance du trafic spatial (EUSST).

Le COSMOS contribue à l'alerte aux populations en conduisant les opérations de surveillance lors de rentrées atmosphériques à risque d'objets spatiaux. Il participe également à la gestion du risque de collisions de satellites, par le suivi et l'affinage des trajectoires potentiellement conflictuelles, au profit et en appui du CNES, qui évalue le risque et propose le déplacement ou non des satellites nationaux.

INDICES D'ACTIVITÉ

- Environ 500 000 débris spatiaux en orbite autour de la Terre (de 1 à 10 cm)
- 12 000 survols d'objets spatiaux au quotidien, au-dessus du territoire national (détectés par le système GRAVES) – un catalogue d'objets spatiaux supérieur à 4 000)
- 60 risques de collision par an
- 10 rentrées atmosphériques à risque, suivies chaque année
- 150 éruptions solaires par an
- 5 000 dossiers d'analyse en appui des opérations annuelles

LA FRANCE INTÈGRE PLEINEMENT L'INITIATIVE COMBINED SPACE OPERATIONS (CSpO)

À l'occasion de la rencontre des représentants nationaux de l'initiative CSpO (*Combined Space Operations*) les 11 et 12 février 2020 à Ottawa, le général Michel Friedling, commandant le CDE, a signé au nom de la ministre des Armées, la lettre d'adhésion à son *Memorandum of Understanding*.

Cette coopération a pour objectif de coordonner les efforts dans le domaine de la défense spatiale, des 7 nations participantes : États-Unis, Royaume-Uni,

DÉFENSE

LE COMMANDEMENT DE L'ESPACE

Canada, Australie, Nouvelle-Zélande, Allemagne et France. Elle cherche en outre à améliorer les capacités spatiales, nationales ou collectives, et à faciliter les opérations spatiales combinées entre les participants.

L'enjeu : être capable de :

- Coordonner les capacités alliées ;
- D'en augmenter la résilience pour assurer le soutien aux opérations multi-domaines ;
- De garantir un accès libre à l'espace ;
- Et d'y protéger les moyens qui s'y trouvent, le cas échéant en coalition.

Forum multilatéral de coordination, de réflexion et d'échanges, le CSpO offre l'opportunité d'atteindre ces différents objectifs.

Des travaux réguliers sont conduits au sein de plusieurs groupes de travail auxquels participent des personnels du CDE de l'armée de l'Air et de l'Espace, de la DGA, de la DGRIS (Direction Générale des Relations Internationales et de la Stratégie) et de la DRM.

Cette initiative rassemblait initialement les États-Unis, le Royaume-Uni, le Canada, l'Australie et la Nouvelle-Zélande. La France et l'Allemagne l'ont rejointe en qualité d'observateurs en 2016, puis comme membres associés en 2017. Désormais, par décision de la ministre des Armées Florence Parly, la France y participera de manière pleine et entière.

L'IMPLANTATION DU CENTRE D'EXCELLENCE OTAN (CEO) POUR L'ESPACE À TOULOUSE

Le 28 janvier 2021, l'OTAN a choisi la France pour accueillir un futur Centre d'Excellence exclusivement dédié à l'espace.

Ce centre réalisera des travaux de doctrine, des formations, des exercices, des analyses et de la prospective en lien avec le Commandement de l'espace (CDE) puisqu'ils seront colocalisés.

Florence Parly, ministre des Armées, a salué cette décision qui illustre la reconnaissance de l'expertise spatiale française et qui consacre la vocation spatiale de Toulouse.

Ce nouveau projet ouvrira durant l'été 2021. Il accueillera, à partir de 2025, plus d'une quarantaine de spécialistes, à la fois français et étrangers : une initiative

innovante qui s'inscrit pleinement dans la stratégie de l'OTAN qui a déjà désigné une douzaine de centres d'excellence parmi ses pays membres, choisis pour leur expertise dans un domaine précis.

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- Arrêté du 3 septembre 2019 portant création et organisation de Commandement de l'espace
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000039060428>
- Annonce par la ministre des Armées Florence Parly, le 24 juillet 2020 en déplacement à Salon-de-Provence, de la nouvelle dénomination « Armée de l'air et de l'espace »
- Biographie du général d'Armée aérienne Philippe Lavigne, Chef d'état-major de l'armée de l'Air et de l'Espace
- Biographie du général de division aérienne Michel Friedling, commandant du Commandement de l'espace.

COMMUNIQUÉ DE PRESSE DE L'ARMÉE DE L'AIR

Paris, le 25 juillet 2020

Déplacement de Florence Parly, ministre des Armées, à Salon-de-Provence le vendredi 24 juillet 2020

- Le vendredi 24 juillet 2020, Florence Parly, ministre des Armées, s'est rendue sur la base aérienne 701 de Salon-de-Provence (Bouches-du-Rhône) à l'occasion de la 1^{ère} des ambassadeurs de l'armée de l'Air et du baptême des élèves officiers de la promotion 2019 de l'École de l'air.
- La ministre des Armées a également présidé la prise de commandement de la base et de l'école par madame le général de brigade aérienne Dominique Arbiol.
- A l'occasion de ce déplacement, la ministre des Armées a annoncé qu'elle autorisait dès à présent, à titre de nom d'usage, les appellations d'« armée de l'Air et de l'Espace » et de « Chef d'état-major de l'armée de l'Air et de l'Espace ».

Extrait du discours du 24 juillet de Florence Parly, ministre des Armées, à Salon-de-Provence :

« L'espace ne doit pas devenir le théâtre de luttes sauvages. Vous en êtes les témoins attentifs, vous en serez les gardiens. Vous serez des acteurs incontournables. Afin d'incarner dès à présent cette mission qui est désormais la vôtre, je vous autorise donc à utiliser, à titre de nom d'usage, l'appellation d' « armée de l'Air et de l'Espace » ».

**BIOGRAPHIE DU GÉNÉRAL D'ARMÉE AÉRIENNE
PHILIPPE LAVIGNE CHEF D'ÉTAT-MAJOR DE
L'ARMÉE DE L'AIR ET DE L'ESPACE**



Le général d'armée aérienne Philippe Lavigne est chef d'état-major de l'armée de l'Air et de l'Espace française.

Il intègre l'École de l'air de Salon-de-Provence en 1985. Breveté pilote de chasse en 1989, il sert en unités opérationnelles sur Mirage 2000 comme pilote de défense aérienne, cumulant quelque

2 850 heures de vol et 46 missions de guerre lors des opérations en ex-Yougoslavie et en Irak.

Au sortir du collège interarmées de défense, il prend le commandement de l'escadron de chasse 1/5 « Vendée » en 2001 sur la base aérienne d'Orange. En 2003, il est appelé à servir en tant qu'expert air de la planification stratégique au Centre de planification et de conduite des opérations (CPCO) au sein de l'état-major des armées. À ce titre, il assure la planification puis la conduite de l'opération « Carbet » en Haïti en 2004 et des opérations de secours aux populations locales en Asie du Sud dans le cadre de l'opération « Béryx » en 2005.

Il rejoint ensuite l'état-major de l'armée de l'Air où il occupe différentes fonctions au bureau « Plans » où il est notamment chargé de la conduite des questions spatiales, du projet européen d'entraînement des pilotes de chasse et des structures de simulation avec plusieurs nations européennes. En 2008, il est choisi comme auditeur du centre des hautes études militaires et de la session « politique de défense » de l'Institut des hautes études de défense nationale (IHEDN).

À l'été 2009, il est nommé sous-directeur en charge des exportations de matériels de guerre au Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN) à Paris.

Il prend ainsi part à l'élaboration des positions françaises sur les questions d'exportations d'armement dans les enceintes internationales. Trois ans plus tard, il est nommé directeur de l'information du chef d'état-major des armées et œuvre au quotidien auprès du major général des armées sur l'ensemble des dossiers préparés par l'état-major des Armées.

Il quitte ensuite Paris pour l'Afghanistan, où il prend le commandement de l'aéroport international de Kaboul et des forces françaises engagées dans l'opération « Pamir ». Il supervise notamment les opérations de transfert de la responsabilité militaire de l'aéroport aux autorités civiles afghanes.

Nommé général de brigade aérienne le 1er janvier 2015, il prend à la même date le commandement de la brigade aérienne de l'aviation de chasse à Dijon, puis à Bordeaux-Mérignac en septembre 2015. Il est notamment en charge de la préparation opérationnelle de l'aviation de combat.

Au mois de juillet 2016, il est appelé auprès du chef d'état-major des armées en tant que chef de cabinet. Il est promu au grade de général de division aérienne le 1er mars 2017.

Il est nommé chef d'état-major de l'armée de l'Air et élevé au rang et appellation de général d'armée aérienne le 31 août 2018.

Commandeur de la Légion d'honneur et commandeur de l'ordre national du Mérite, il est décoré de la croix de la Valeur militaire.

Né à Bergerac le 25 septembre 1965, le général Lavigne est passionné de rugby, sport qu'il pratique encore.

**BIOGRAPHIE DU GÉNÉRAL DE DIVISION
AÉRIENNE MICHEL FRIEDLING COMMANDANT
DU COMMANDEMENT DE L'ESPACE, PARIS**

Né en 1967, le général de division (Air) Michel Friedling est issu de la promotion 1986 de l'École de l'air de Salon-de-Provence dont il sort avec un diplôme d'ingénieur aéronautique. Breveté pilote de chasse en 1989, il exerce diverses responsabilités en unités opérationnelles sur Mirage F1 et Mirage 2000 sur la base aérienne de Cambrai. Il participe à plusieurs opérations extérieures en Afrique, dans les Balkans et au Moyen-Orient entre 1990 et 1998.

Après deux ans à l'École de l'air comme chef de promotion (1998-2000), il est diplômé de l'École de Guerre en 2001 et prend le commandement de l'escadron de chasse et d'expérimentation de la base aérienne de Mont-de-Marsan. De 2001 à 2004, son unité prépare l'entrée en service du Rafale et réalise les tests opérationnels de tous les nouveaux systèmes d'armes et armements livrés à l'Armée de l'Air.

Il passe ensuite cinq ans au Bureau Plans de l'État-major de l'Armée de l'air, chargé du développement des capacités de l'aviation de combat et de la coopération multinationale sur ce sujet.

Il commande la base aérienne 113 de Saint-Dizier entre 2009 et 2011, période durant laquelle le missile nucléaire ASMP-A est mis en service opérationnel. Il participe directement au succès des premiers raids de l'Armée de l'air lancés depuis Saint-Dizier au-dessus de la Libye

en mars 2011 dans le cadre de l'opération Harmattan. Il effectue également la mise sur pied de la base de défense de Saint-Dizier / Chaumont en mutualisant les services de soutiens communs de la base aérienne et du 61^{ème} régiment d'artillerie.

Diplômé en 2011 du Centre des Hautes Études Militaires (CHEM) et de l'Institut des Hautes Études de la Défense Nationale (IHEDN), le colonel Michel Friedling est affecté à l'État-major des Armées. Il s'occupe successivement de la dissuasion nucléaire (2012-2013), puis de prospective et stratégie militaire (2013-2014). Il prend ensuite la direction du bureau plans de l'état-major de l'armée de l'air (2014-2016).

Dans ses différentes fonctions d'État-major, il participe aux travaux des Livres Blancs de 2008 et 2013, ainsi qu'aux lois de programmation militaire 2009-2014 et 2014-2019.

Entre août 2016 et février 2017, il représente la France auprès de la composante aérienne de la coalition internationale contre Daesh et exerce depuis le centre d'opérations interalliées d'Al Udeid (Qatar) le contrôle de la composante aérienne française. Sous son commandement, plus de 300 frappes sont menées par les avions français pour la libération de Mossoul (Irak) et le début de l'offensive pour la libération de Raqqa (Syrie). Il est décoré de la Croix de la Valeur Militaire et de l'US Meritorious Service Medal à cette occasion.

Promu général de brigade aérienne le 1er juin 2017, il prend en charge la prospective et la stratégie à l'état-major des Armées et seconde le chef d'état-major des Armées (CEMA) lors de la revue stratégique de défense nationale. Il est également chargé de l'innovation et participe à la création de l'agence de l'innovation de défense.

En septembre 2018, le général de brigade aérienne Friedling est nommé commandant du Commandement Interarmées de l'Espace et participe aux travaux de la revue spatiale qui conduit à la stratégie spatiale de défense française publiée en juillet 2019. Le général Michel Friedling, promu général de division aérienne en septembre 2019, prend la tête du Commandement de l'espace créé le 3 Septembre 2019.

Le général de division aérienne Michel Friedling totalise 71 missions de guerre et environ 2400 heures de vol. ■

HACKATON ACTINSPACE 2020 : RETOUR SUR LA PREMIÈRE ÉDITION MARSEILLAISE

par Rachid Alhiane Marseille-Innovation, Louis Fabre, président du Groupe régional 3AF Provence, Jean Louis Quintana 3AF



Les 13 et 14 novembre 2020 s'est déroulé la 4^e édition du hackathon international ActInSpace (actinspace.org). À cette occasion la première édition Marseillaise a été organisée localement par le centre européen d'entreprises et d'innovation Marseille Innovation (<http://www.marseille-innov.org/>) en partenariat avec la Région Sud, le CNES et le groupe Provence de la 3AF. Cette édition complètement dématérialisée a été un succès grâce au talent des participants et à la mobilisation des partenaires locaux.

ActInSpace est un évènement international biennal, né en 2014 de l'initiative du CNES et organisé en partenariat avec l'ESA et Airbus, dont le but est d'encourager l'esprit entrepreneurial, stimuler la création de start-up innovantes en s'appuyant sur les technologies spatiales autour de 3 grands thèmes : « *Be a newspace player* », « *Everyday life business* » et « *Space for earth and humanity* ».



Malgré le contexte sanitaire actuel, cette 4^{ème} édition a vu l'inscription de 3615 participants représentant 534 équipes et s'est déroulée simultanément dans 58 villes réparties sur 35 pays, sur les 5 continents. Chaque ville a organisé, en simultané, les 13 et 14 novembre 2020, sa propre édition.

Pendant 24h, sans arrêt, les participants, majoritairement des étudiants encadrés par des professionnels des secteurs de l'aéronautique et de l'aérospatial, se confrontent en imaginant des innovations et de nouveaux services à partir des défis proposés par le CNES, l'ESA, Airbus et leurs partenaires. Ces défis sont basés sur des brevets ou des données satellitaires que les partenaires souhaitent valoriser.

Animés par la volonté de créer leur entreprise, tout en proposant des solutions innovantes pour la planète, pour les citoyens ou pour l'emploi (c'est-à-dire des solutions pour lutter contre les effets du réchauffement climatique, améliorer la vie quotidienne ou simplement l'une des nombreuses questions sur les défis de demain), des participants de tous âges, et de tous horizons ont travaillé continuellement pendant deux jours, espérant être sélectionnés pour participer à l'épreuve internationale.

UNE ÉDITION MARSEILLAISE 100% VIRTUELLE

Organiser une édition à Marseille a été un choix évident : La métropole Marseillaise possède un riche tissu industriel aéronautique et spatial, avec la présence d'entreprises comme Airbus Helicopters, premier employeur de la région, Dassault Aviation, Safran, un réseau de PME efficaces, Comex, Polyshape, d'universités, d'écoles d'ingénieurs et de laboratoires de recherche réunis au sein du pôle de compétitivité SAFE ainsi que des projets structurants comme celui du Techno-centre industriel Henri Fabre.

L'édition locale a attirée 70 candidats (étudiants, chercheurs, amateurs, passionnés, porteurs de projets, etc.) regroupés en 10 équipes pour répondre à des défis sur des thèmes très variés :

- *Airbus01 Fight for climate change,*
- *SES01 Are you dead or alive?*
- *AIDo4 Area Surveillance 24 hours a day,*
- *Airbus02 The power of earth observation and AI,*
- *Airbus03 The moon race challenge ready, set, launch!*
- *ESA06 Give me a hand,*
- *AIDo1: The cloud in outer space,*
- *Continental01: What could be done with cars data?*

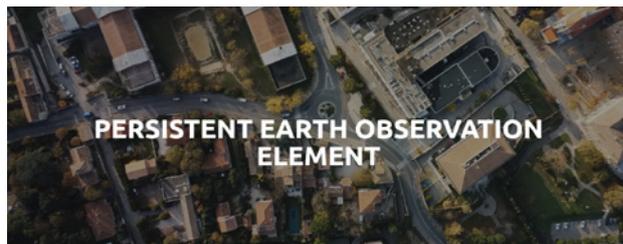
Pendant toute la durée de l'épreuve les équipes ont été soutenues par plus de 18 coaches et experts locaux de Marseille Innovation, 3AF, CNES, INPI et spécialistes de la création d'entreprises innovantes. Les équipes ont également assisté à distance à plusieurs ateliers thématiques, tels que Business Model Canvas, Pitch Elevator, Méthode Agile, Design Thinking et UX Design, qui les ont aidées à structurer leur projet.

Durant cette première édition marseillaise, les équipes locales ont rivalisé d'imagination pour proposer des solutions innovantes de valorisation des technologies du spatial au profit de la planète et de l'humanité : prévenir les feux de forêts, soutenir une agriculture durable, préserver les océans, la biodiversité, etc.

Samedi 14 novembre à 15h30, après 24 heures de travail, les équipes ont présenté leurs projets devant un jury de 11 membres composé des organisateurs, d'ingénieurs, de directeurs d'établissements d'enseignement supérieur publics et privés, d'enseignants-chercheurs, de chef d'entreprises ou de personnes spécialisées dans l'accompagnement d'entreprises et notamment de start-ups. Suite aux délibérations des jurys, 2 équipes ont été primées : PEOXEL et H2T.

PEOXEL : OBSERVATION PERSISTANTE DE LA TERRE EN DIRECT

L'observation de la Terre depuis le ciel existe depuis que l'homme sait voler, ces dernières années les applications se sont diversifiées avec l'essor de nouveaux capteurs et de nouvelles plateformes.



Depuis le ciel, on a une vue d'ensemble, comme sur un plateau de jeu. On peut observer ce qui est inaccessible, voire invisible depuis le sol, ce qui permet par exemple d'évaluer les dégâts après une catastrophe naturelle. L'utilisation fréquente et intéressée de ce point de vue a permis le développement de nombreux outils de traitement d'image pour extraire des informations spécifiques. On peut par exemple faire une représentation 3D de structures au sol grâce à de multiples photos du ciel. Aujourd'hui, deux moyens d'observation sont particulièrement en vogue, les satellites et les drones.

Ces systèmes ont leurs avantages et leurs inconvénients. PEOXEL, souhaite en récupérer le meilleur des deux. Les satellites d'observation de la Terre, disponibles pour un usage civil, proposent au mieux une résolution de 30 cm/px. Pour atteindre ces performances, ils sont en orbite basse et ne peuvent pas rester statiques au-dessus d'un point de la Terre. Ils repassent au-dessus du point après plusieurs jours et les images récoltées mettent plusieurs heures à être traitées et transférées, donc ils ne peuvent pas faire de direct. Les drones peuvent rester au-dessus d'un point et transmettre leurs données en direct mais ils ont une endurance limitée à quelques heures. PEOXEL s'inscrit entre les deux en proposant une vidéo d'observation de la Terre en direct et pendant une durée de plusieurs jours. Ce souhait d'avoir le meilleur des satellites et des drones a inspiré le nom de l'entreprise. PEOXEL est la contraction de *Persistent Earth Observation Element*, un clin d'œil à celle de Pixel pour Picture Element.

L'équipe de PEOXEL, est constituée de François De Vecchi et de Paul Aubin, deux passionnés de nouvelles technologies qui sont amis depuis les classes préparatoires du Lycée Thiers à Marseille. François De Vecchi

HACKATON ACTINSPACE 2020 : RETOUR SUR LA PREMIÈRE ÉDITION MARSEILLAISE

à fait l'École polytechnique avec un double diplôme de l'Imperial College de Londres. Paul Aubin a fait SUPAERO avec un Master of Engineering de l'université McGill.



À gauche, François De Vecchi, X / Imperial College et à droite, Paul Aubin, Supaero / McGill University

Professionnellement, François De Vecchi dispose de 6 ans d'expérience au sein d'une société spécialisée dans le développement de solutions digitales et de systèmes de contrôle-commande pour les infrastructures de transport et les villes. Il a évolué en tant que business développeur avec un portefeuille d'activités avoisinant les 3 millions d'euros pour des clients publics et privés dans de multiples secteurs : énergies, transport, sécurité et ville intelligente. François De Vecchi occupe la place de CEO chez PEOXEL.

Paul Aubin a passé 5 ans au sein d'une entreprise française de fabrication de drones pour les particuliers et les professionnels. Il a été responsable des algorithmes de stabilisation du vol et a évolué comme manager d'une équipe de 10 personnes sur le développement des nacelles qui stabilisent mécaniquement la caméra des drones. Paul Aubin est le CTO de PEOXEL.

Parce qu'ils se sont retrouvés sur l'envie de créer une entreprise et sur les mêmes sujets, ils ont décidé de se lancer en octobre 2020 dans leur projet d'entreprise.

In fine PEOXEL ça apporte quoi ? Une carte de la Terre, en direct et abordable. L'équipe souhaite répondre aux problématiques d'anticipation et de suivi que rencontrent les grands sites, qu'ils soient industriels ou naturels. Les applications potentielles sont nombreuses comme l'observation du trafic dans les agglomérations, la levée de doute sur un départ de feu, la détection de fuites en Oil & Gaz, l'inspection de lignes électriques, la protection de la faune contre le braconnage ou encore la surveillance de sites sensibles.

Technologiquement parlant, cela se concrétise par un produit mixant la légèreté d'un drone impulsé par l'énergie d'un panneau photovoltaïque, en un mot : un drone avion solaire. Le produit possède des panneaux photovoltaïques sur les ailes ainsi que des batteries dans les ailes, ce qui lui permet de se propulser avec l'énergie du soleil la journée et de restituer la nuit pour rester en vol. C'est un système qui a déjà fait ses preuves dans le cadre de développements industriels. Le drone a pour objectif d'atteindre une altitude de 5000 m. PEOXEL se charge alors de l'opérer et met à disposition les images pour les clients, publics et privés.

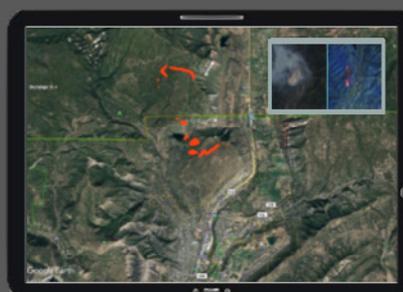
Quand vous êtes client, l'accès à la vidéo se fait via une simple interface web. Vous pouvez faire une commande sur un lieu et une date, puis accéder au direct et consulter a posteriori la base de données. PEOXEL prévoit d'avoir un prototype du porteur et de sa charge utile dans un an,

Compléter les zones grises des cartographies de satellites



Base de donnée

Accéder à une information difficile à capter à bas coût : incendie, pollution, suivi de réseau

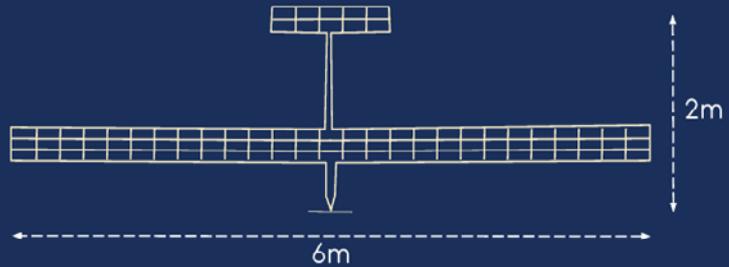


Service

CAPACITÉS OPÉRATIONELLES DU P5

UN DRONE DISCRET À TRÈS LONGUE ENDURANCE

- Masse totale : 7 kg
- Altitude < 5000m
- Vitesse :
 - croisière : 45 km/h
 - max : 60 km/h
- Endurance :
 - $|\text{Lat}| < 27^\circ \rightarrow \infty$
 - $|\text{Lat}| < 50^\circ \rightarrow 7$ jours
 - Nuit $\rightarrow 10$ H
- Rayon d'action ~ 7500 km



pour une commercialisation complète du service dans deux ans.

François De Vecchi et Paul Aubin ont participé en 2020 au challenge ActinSpace dont ils ont remporté l'édition locale à Marseille. L'événement a permis d'échanger sur la technologie avec des acteurs majeurs de l'aérospatial comme le CNES et Airbus ainsi que sur les applications potentielles avec l'Agence Innovation Défense (AID). Dans la foulée, le projet a été accepté à l'incubateur Belle de Mai et à Marseille innovation. Une candidature est en cours pour être accompagnée par l'ESA.

Avec l'envie de poursuivre sur cette belle lancée, l'équipe a les objectifs suivants : côté business elle souhaite confirmer l'intérêt des clients démarchés par des lettres d'intention voire des précommandes. Cela permettra de définir et de réaliser un outil sur mesure pour capter exactement l'information dont les clients ont besoin. Les campagnes de vols pourront alors débiter pour valider dans un premier temps la capacité de PEOXEL à récolter cette information et à la traiter. C'est une étape qui peut se réaliser avec des ballons atmosphériques pour simuler une prise de vue en haute altitude. La campagne est prévue pour 6 mois, en parallèle, PEOXEL devra réaliser le développement du porteur, avec un premier prototype attendu après 12 mois.

Des partenariats avec des universités et des institutions comme l'ISAE-SUPAERO, l'ONERA et le CNES sont prévus pour participer à l'activité de R&D. Pour financer ses premiers pas, PEOXEL souhaite répondre à des appels à projet auprès d'acteurs régionaux et européens et se rapprocher d'investisseurs.



UNE NOUVELLE APPROCHE DE L'AGRICULTURE DE PRÉCISION BASÉE SUR L'INTERNET DES OBJETS CONNECTÉS (IoT)

Perte de nutriments en 40 ans d'agriculture : L'Université du Texas aux USA a étudié l'évolution des teneurs de 13 nutriments (protéines, lipides, glucides, fer, thiamine, riboflavine, niacine et l'acide ascorbique, etc.) dans les fruits et légumes entre 1950 et 1993 à partir de la base de données de composition nutritionnelle américaine du Département de l'agriculture américain (USDA), ce qui a permis de révéler un déclin significatif entre 1950-1993 sur les 43 aliments pour les protéines (-6%), le calcium (-16%), phosphore (-9%) et le fer (-15%), la riboflavine vitamine B2 (-38%) pour les valeurs médianes alors qu'il n'y avait pas de changement significatif pour les autres nutriments. Selon la même étude, cela est dû principalement aux *méthodes environnementales et génétiques* pour accroître le rendement des cultures ce qui entraîne principalement une dégradation de la qualité du sol.

Dans ce contexte, les campagnes nationales exploratoires de mesures menées par les laboratoires ne permettent pas de fournir un jeu de données récentes et en temps réel notamment lorsque les producteurs en auront le plus besoin (lors de "saison de croissance").

La majorité des producteurs se basent principalement sur des modèles génériques, sur leurs expériences et sur des rapports de tests en laboratoire très coûteux (voir

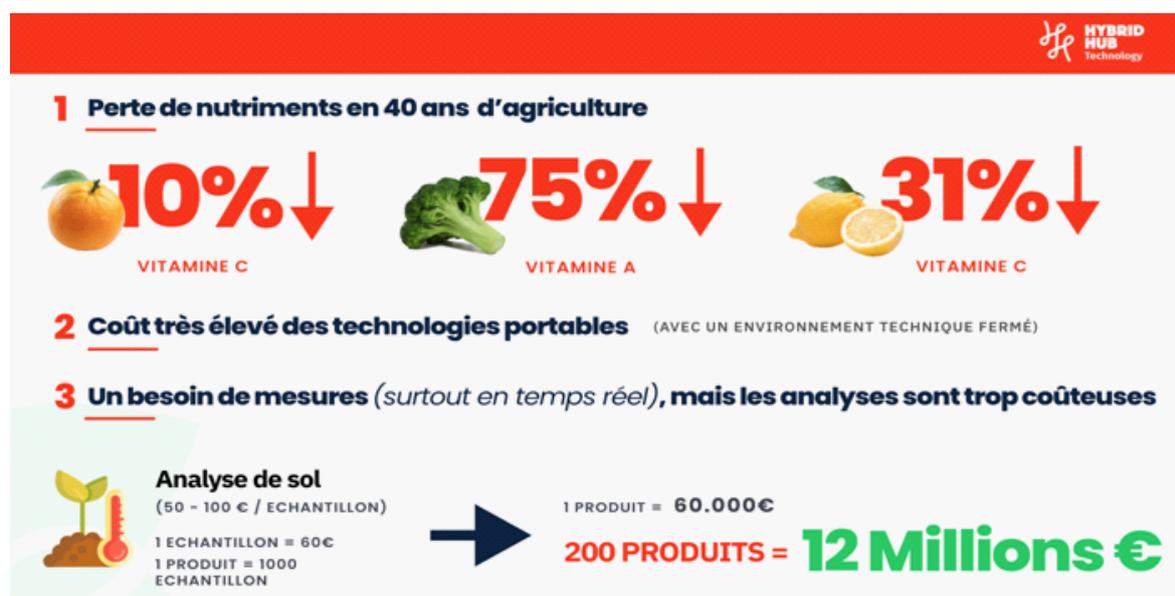


Figure 1. Extrait du rapport H2T

Figure 1) pour manipuler le sol et prendre des décisions liées aux engrais (qui constitue 50% des coûts d'exploitation de l'agriculteur) ; ce qui provoque naturellement une sur-fertilisation ou sous-fertilisation et entraîne une mauvaise gestion du sol à long terme.



Les fondateurs d' HybridHub Technology (H2T)

À gauche, Hamza Baqa, Directeur de recherche et PHD, Expert IoT, à droite, Youssef Berdai, Directeur des opérations & ML software engineer

Hybridhub Technology (H2T) s'appuie sur l'expertise de son équipe, issue du milieu de la recherche industrielle et de l'ingénierie logicielle, pour apporter une solution aux problématiques liées à la qualité du sol et offrir un service de conseil stratégique sur mesure dans le déploiement IoT à grande échelle.

En effet, les fondateurs se sont croisés en 2017, lors d'un meeting *High Tech* à Sophia Antipolis et 3 ans plus tard, l'envie d'entreprendre et de lutter contre le changement climatique les a poussés à développer au printemps 2020, la plateforme H2T (voir Figure 2).

Le duo scientifique H2T est composé de Hamza Baqa, expert IoT et docteur-ingénieur de l'Institut polytechnique de Paris (l'X), ayant travaillé 4 ans, en tant que chercheur senior, dans des projets de déploiement IoT à grande échelle. Il a également contribué dans la standardisation internationale (ITU-T, ISO, W3C, etc.) ; à son actif, plusieurs publications de renommée internationale, dont les travaux sont axés sur la *Réalisation de la confiance par une auto-adaptation sémantique dans l'Internet des objets (IoT)*. Et du co-fondateur Youssef Berdai, ingénieur R&D, diplômé en ingénierie en mathématiques et en informatique de l'université de Perpignan, ayant fait sa carrière dans des entreprises du CAC 40 (ATOS, Orange, ESN, etc.) en tant que consultant IT et project manager. Doté d'un background en modélisation mathématique, passionné par l'architecture et la conception des applications « *cross platform* » dans un contexte innovant (IA & Cloud), Youssef Berdai s'occupe actuellement des axes de recherche et déploiement orientés intelligence artificielle.

En novembre 2020, les deux fondateurs ont choisi le programme ActInSpace pour présenter leur projet innovant devant un jury exceptionnel composé d'acteurs de l'aérospatial (Airbus, CNES) et de l'entrepreneuriat (Marseille Innovation) et ont su booster l'audience de leur solution, en remportant le 2^{ème} prix du Hackathon.

Figure 3. La plateforme H2T

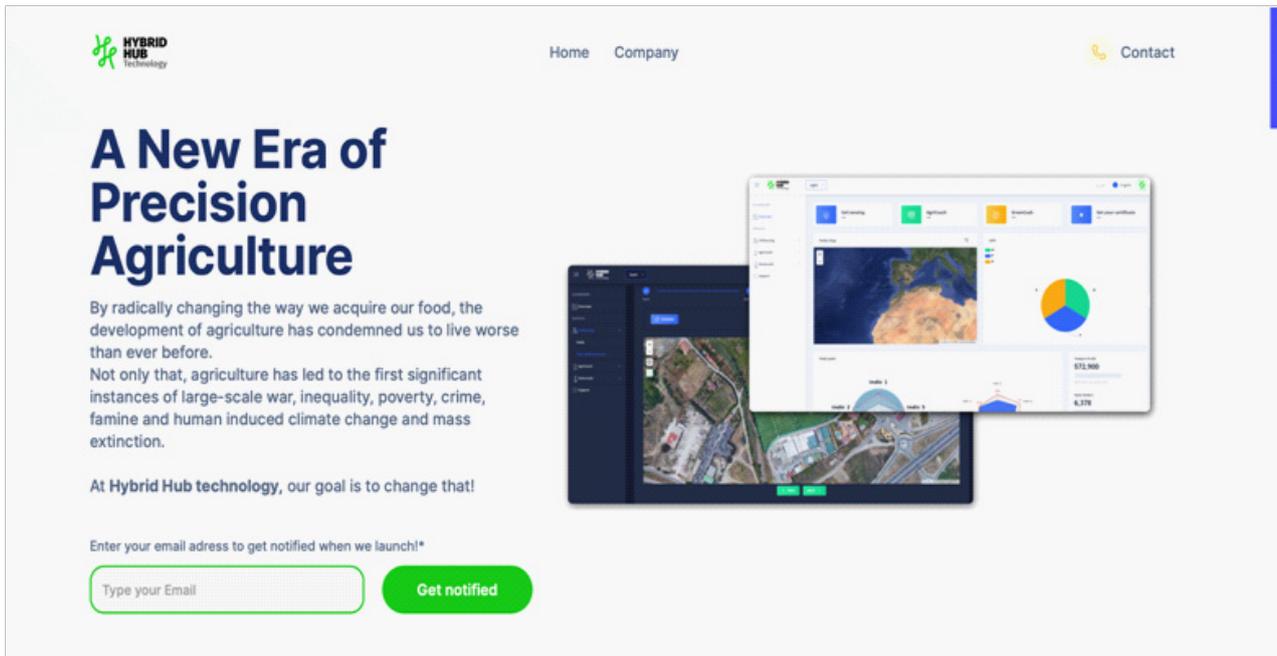
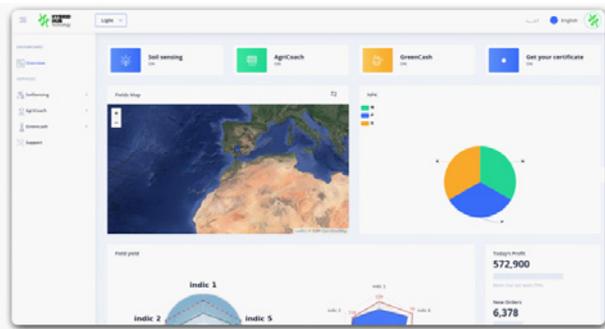


Figure 2. La plateforme H2T (<https://hybridhub.tech>)



Hybrid Hub Technology (H2T) est une startup qui innove dans le domaine de l'AgriTech en proposant des services numériques basés sur l'IoT (Internet des objets connectés), permettant l'acquisition, monétisation et traitement intelligent des données de l'environnement agricole (qualité de sol, Eau, Air, etc. voir Figure 3).

Techniquement, comment fonctionne la plateforme H2T ? Il s'agit d'une solution logicielle qui fait le lien entre les équipements du monde agricole et les applications/services. Elle centralise les données provenant de différentes sources : drones, satellites, capteurs IoT, Sigfox & LoRa, contrôleur 4G, etc. pour les unifier et les enrichir dans un référentiel unique. Les données acquises sont ensuite structurées et envoyées dans le bon format à toute application qui en aurait besoin. H2T propose 3 applications:

- **Soil Care** : une plateforme standardisée, interopérable

et sécurisée qui apporte des analyses en temps réel liées au domaine de l'agriculture. Elle combine des flux de données basées sur les technologies de l'internet des objets (capteurs, actionneurs, etc.), ainsi que des imageries de drones et satellites, permettant aux acteurs du monde agricole un suivi en temps réel des différents paramètres liés au sol (CO₂, O₂, pH, etc.).

- **GreenCash** qui offre à ses clients la possibilité de monétiser leurs données agricoles grâce au système de *Smart Contract* basé sur la Blockchain
- **AgriCoach**, une solution prédictive basée sur l'IA, offrant aux agriculteurs des recommandations liées au choix des semences et fertilisants.

Après leur passage par le Hackathon ActInSpace Marseille 2020, dont ils sont lauréats, les deux fondateurs se réjouissent de faire partie du réseau 3AF Provence et continuent leurs travaux de développement en s'appuyant sur une collaboration étroite avec le Laboratoire informatique de l'Institut polytechnique de Paris et un partenariat avec l'INRAE (l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) en vue d'acter l'avenir R&D de la startup. ■

ÉLÉMENTS DE PILOTAGE D'AÉROCLUB

par Patrick Gilliéron, membre de la commission Aviation légère et machines dérivées, Ex-président d'aéroclub¹

Des ordres de grandeur sur l'activité d'aviation légère sont rappelés pour positionner le fonctionnement annuel moyen d'un aéroclub en termes de nombres de membres, d'appareils et d'heures de vol. Ces ordres de grandeur sont utilisés pour déterminer les seuils de rentabilité d'un avion DR400 120 mis à disposition dans des aéroclubs de 75 à 350 membres. Les tarifs horaires étant ajustés au mieux des intérêts de l'aéroclub, les incidences des nombres de membres, d'avions par membre, d'heures annuelles de vol par membre et d'emplois salariés sur le compte de résultat peuvent être simulées et analysées. Les résultats obtenus en faisant varier le nombre de membres montrent la forte influence de ce paramètre sur l'attractivité tarifaire, les services proposés aux adhérents et confirment l'intérêt du regroupement des petites structures pour réduire les charges fixes.

INTRODUCTION

Au-delà du seul plaisir de voler, la conduite d'un aéroclub nécessite le recours à des outils de pilotage pour rechercher les meilleurs compromis entre les tarifs et les services. L'équipe dirigeante d'un aéroclub, souvent une association de type loi 1901, doit rechercher l'équilibre entre le nombre d'avions et le nombre de membres, les meilleurs tarifs horaires pour chaque avion, estimer un compte prévisionnel de résultat, adapter son fonctionnement et sa flotte à l'évolution des nombres de membres et des heures de vol, penser pédagogie et sécurité, fidéliser ses adhérents et compenser les inévitables départs par le recrutement.

Cet article fournit quelques chiffres clefs sur la pratique de l'aviation légère (*nombre de membres par aéroclub, nombre d'heures de vol annuel par adhérent, nombre d'avions par membre, etc.*) pour ensuite rappeler les principes de détermination et d'utilisation du tarif horaire pour le seuil de rentabilité. Ces chiffres et ces rappels, complétés d'ordres de grandeur pour les dépenses et les recettes, sont utilisés pour déterminer les tarifs horaires des seuils de rentabilité d'un avion DR400 120 en faisant varier le nombre de membres. Les tarifs étant alors ajustés aux meilleurs intérêts de l'aéroclub, les résultats peuvent être utilisés pour réorienter la stratégie, accroître les performances du compte de résultat et pérenniser l'activité.

LES CHIFFRES CLEFS DE L'AVIATION LÉGÈRE

Les données statistiques mises en ligne par la Direction Générale de l'Aviation civile [1 & 2] montrent une diminution constante du nombre de licenciés à la FFA de 1995 à 2010 associée à une perte cumulée de 15% sur 15 ans. Certains aéroclubs n'étant pas affiliés à la FFA, certaines données peuvent ne pas être prises en

compte mais les informations fournissent des tendances qui peuvent être considérées comme représentatives de l'activité d'aviation générale (voir Figure 1).

À partir de 2010, la situation s'améliore légèrement, augmente, fluctue puis semble se stabiliser autour de 42109 adhérents en 2019 avec une réduction proche de 11% par rapport à 1995. Les conséquences négatives des crises financières de 2008 et 2015 sur les nombres de membres, d'heures de vol et de brevets apparaissent clairement sur les figures 1 et 2 et durent deux années. Les impacts les plus significatifs portent sur le nombre des brevets qui diminue respectivement de 19% entre 2008 et 2010 et de 30% entre 2015 et 2017 tandis que les nombres d'heures de vol régressent respectivement de 2 et 7%. La tendance s'inverse de manière significative en 2018 mais tend à se stabiliser en 2019 ; la réduction du nombre de brevets obtenus en 2019 par rapport à 2015 n'est plus que de 8%. L'épidémie du Covid-19 de 2020 laisse cependant entrevoir de nouvelles réductions des nombres de membres et des heures de vol compte tenu des pertes financières (chômages ou temps partiels) associées aux réductions successives d'activités enregistrées depuis le 17 mars 2020.

Concernant le nombre d'heures de vol réalisé en moyenne par aéroclub, ce nombre diminue de 1188 heures en 1995 à 923 heures en 2019 en fluctuant régulièrement à partir de 2004. En 25 années, le nombre d'heures de vol par aéroclub s'est ainsi réduit de 22%, soit une moyenne de 0,9% par an (voir Figure 3). À noter que l'évolution du nombre d'aéroclubs apparaît en opposition avec l'évolution du nombre de membres entre 2007 et 2010 puis entre 2013 et 2019, ce nombre augmente de 5% entre 2007 et 2010 et diminue de 5% entre 2013 et 2019 (voir Figure 1).

1. rdmfa.pgillieron@orange.fr

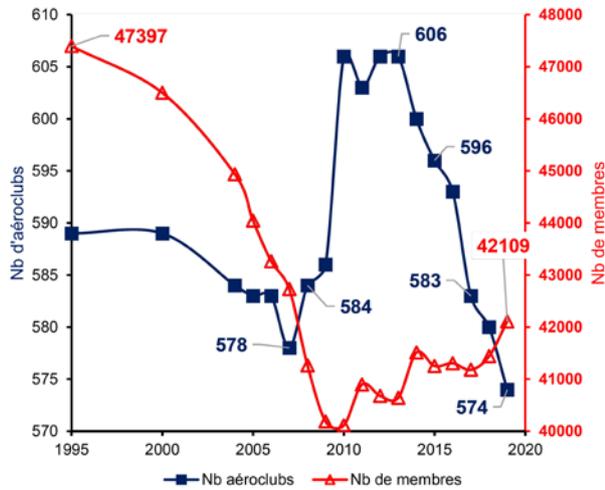


Figure 1. Nombres d'aéroclubs et de membres entre 1995 et 2019.

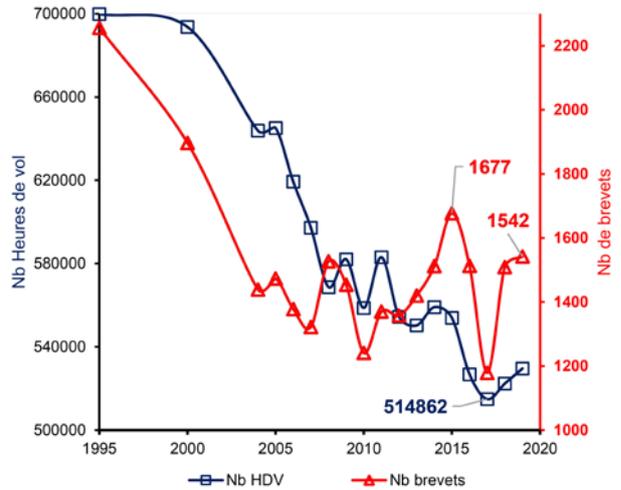


Figure 2. Nombres d'heures de vol et de brevets entre 1995 et 2019

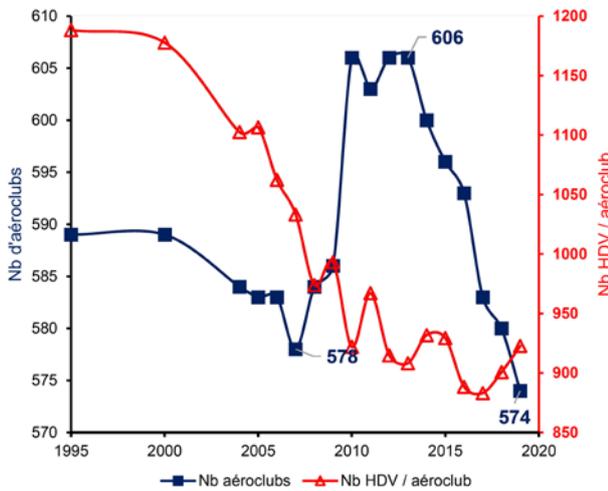


Figure 3. Nombre d'aéroclubs et nombre d'heures de vol par aéroclub entre 1995 et 2019.

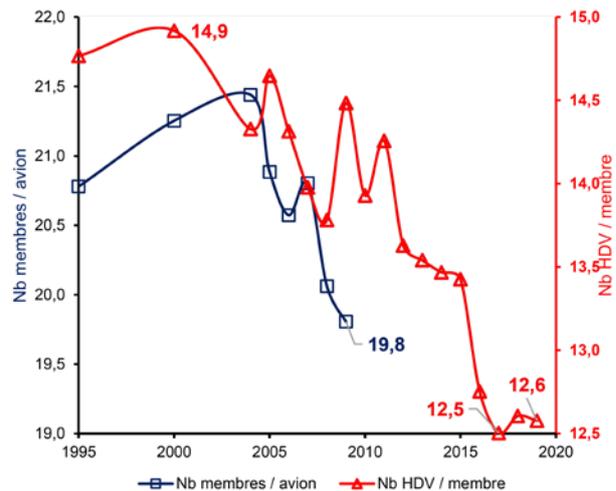


Figure 4. Nombre de membres par avion et nombre d'heures de vol par membre.

Le processus de détermination du nombre d'avions a changé à partir de 2010 (séparation entre ceux qui sont exploités et ceux qui sont en propriété).

Il est intéressant de relever l'évolution du nombre moyen d'heures de vol effectuées par chaque membre sur une année (voir Figure 4). Cette évolution suit celle du nombre annuel moyen d'heures de vol réalisé par chaque aéroclub jusqu'en 2017 à l'exception de l'année 2014. La moyenne de l'ordre de 14,9 heures en 2000, diminue, fluctue entre 2005 et 2012, décroît de 2011 à 2017 et très rapidement à partir de 2015 suite à la crise financière. Le faible rebond relevé en 2018 s'annule pratiquement en 2019 pour tendre vers 12,6 h/an. Le nombre moyen d'heures de vol effectuées par membre de l'année 2000 à l'année 2019 décroît ainsi de 2,3 heures par an. À ce déficit annuel d'heures de vol est associée une perte de recettes

des aéroclubs de l'ordre de 12×10^6 € pour les 42109 licenciés de 2019 et un prix moyen de location des avions de 130 € (tarif horaire moyen d'un DR400 120). À noter que le nombre de membres par avion augmente de 1995 à 2004 puis diminue jusqu'en 2009 pour se situer autour de 20 sans qu'il soit possible d'identifier l'évolution entre 2009 et 2020 suite à un changement de protocole dans la détermination du nombre d'appareils [1] (voir Figure 4).

À noter également qu'il existe de fortes disparités au niveau du nombre de membres et par suite des flottes et des heures effectuées sur une année dans chaque aéroclub [2]. Certains aéroclubs, proches des grandes métropoles

comme Grenoble, Paris ou Toulouse, réussissent à réaliser plus de 4000 heures de vol par an tels les aéroclubs du Dauphiné (6538 h avec 21 avions) ou Air France Toussus (4871 h avec 15 avions) tandis que d'autres ne possèdent qu'un seul avion pour 262 heures annuelles [2].

Il est enfin à remarquer que si le nombre d'heures annuel effectué par chaque pilote reste proche de 12, un tiers des pilotes effectue moins de 6 heures, un tiers moins de 12 heures tandis que le tiers restant réalise le nombre d'heures nécessaire pour que la moyenne annuelle se situe autour de 12. L'absence d'entraînement régulier déconditionnant les réflexes acquis, les licenciés qui volent moins de 12 heures par an (au minimum 1 h/mois) sont plus susceptibles que d'autres d'occasionner des incidents ou des accidents sur les appareils et par suite d'engendrer des dépenses imprévues.

RENTABILITÉ D'UN APPAREIL

La rentabilité d'un appareil s'évalue à partir du volume d'heures à partir duquel les recettes permettent de couvrir l'ensemble des charges associées à son utilisation. Ce volume d'heures, exprimé en Euros, définit le seuil de rentabilité et est associé à un tarif horaire de location pour l'avion considéré. Sa valeur se détermine à partir de données spécifiques à l'aéroclub, des caractéristiques des avions et par suite des montants des charges et des recettes.

Les données de l'aéroclub portent sur le nombre de membres actifs (*ceux qui payent les heures de vol*) fonctions du positionnement de l'aéroclub par rapport aux grandes agglomérations (*Ouest Paris, Toulouse*) du nom (*Airbus, Safran, Dassault, etc.*) ou de la renommée de l'aéroclub, sur le nombre d'avions, le nombre annuel moyen d'heures de vol effectué par membre, sur le nombre d'heures élèves et d'instructeurs, le tarif horaire de la double, le prix du litre d'essence, la surface et les montants des assurances des bâtiments (administratif et hangar).

Les caractéristiques de l'avion portent sur sa puissance et par suite sa consommation horaire (*25 litres à l'heure pour 100 ch en moyenne*), sur le tarif de l'assurance retenue, les coûts de remplacement du moteur et de l'hélice à affecter aux amortissements et le tarif de l'heure de vol facturé aux membres. Ce tarif est fonction du coût de revient mais doit le plus souvent être adapté aux tarifs qui peuvent être proposés par d'autres aéroclubs sur une même plateforme (concurrence).

Les charges fixes intègrent :

- les divers achats tels les fournitures nécessaires au fonctionnement des locaux de l'association (*fournitures administratives, fuel, électricité, eau, etc.*), les factures d'essence, les variations de stock ;
- les coûts des services extérieurs tels que les primes d'assurance, les coûts des documentations techniques, les factures pour l'entretien et la maintenance des appareils et des locaux, les coûts de location (*ADP, chambre de commerce, etc.*), les taxes d'atterrissage, les frais de poste, de téléphone et d'internet, les services bancaires, les chèques vacances et autres divers frais tels les éventuels remboursements de frais kilométriques à verser aux bénévoles qui se déplacent pour l'intérêt commun, les remises éventuelles à consentir sur les heures de vol et autres frais possibles de réception ;
- les impôts et diverses taxes ;
- les charges de personnel (*salaires chargés*) ;
- les intérêts d'emprunts ;
- les remboursements d'emprunts ;
- les dotations au renouvellement de la flotte (indispensable pour pérenniser l'existence de l'aéroclub).

Les charges variables sont fonctions du nombre d'heures effectuées par chaque appareil et sont calculées sur la base du remplacement des moteurs (*2000 heures en moyenne*), des hélices (*2000 heures*) et des coûts moyens de maintenance liés aux achats de liquides et de pièces nécessaires aux diverses opérations d'entretien ; nombre de 50 heures, de 100 heures, de 500 heures, de 1000 et 2000 heures à effectuer sur l'année. Sont également intégrées dans ce poste, l'estimation d'une provision pour les imprévus (incidents sur un train d'atterrissage, une verrière à remplacer, etc.).

Les recettes se composent des montants des cotisations d'adhésion, des cotisations exceptionnelles votées par le comité directeur pour faire face aux situations difficiles (*casse d'avion par exemple*), des montants horaires forfaitaires de formation (*école*) et/ou d'entretien des compétences (*membres brevetés*), des recettes issues de permanences non effectuées (si inclus dans le règlement intérieur), des vols découverte et autres ressources telles que la location d'emplacement de hangar pour le stationnement d'avions extérieurs ou des recettes de tombola.

Le seuil de rentabilité de l'appareil i, exprimé sous forme de tarif horaire (€/h) et noté *TSR_i*, s'obtient alors à partir des données capitalisées sur les exercices précédents et des projections effectuées sur l'exercice

VIE 3AF ÉLÉMENTS DE PILOTAGE D'AÉROCLUB

à venir. Pour une flotte d'appareils homogènes dont les coûts d'entretien et de réparation sont quasi-identiques¹, sa valeur est donnée par l'équation d'équilibre entre les produits (*membre de gauche*) et les charges (*membre de droite*) :

$$\left[TSR_i (\text{€}/h) + \frac{TRecF}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right] * nhA_i = \left[\left(\frac{TChF}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right) + \left(CHE + \frac{TChV}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right) \right] * nhA_i$$

De cette équation, il vient :

$$TSR_i (\text{€}/h) = \left(\frac{TChF - TRecF}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right) (\text{€}/h) + \left(CHE + \frac{TChV}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right) (\text{€}/h)$$

avec :

N, le nombre d'appareils de l'aéroclub ;

i, l'indice de l'appareil qui varie de 1 à N ;

TChF, le total annuel des charges fixes pour l'aéroclub en € tel que ;

$$TChF = \sum_{i=1}^N P_i TChF \text{ où } P_i \in]0,1[\text{ tel que } \sum_{i=1}^N P_i = 1$$

avec ;

$P_i TChF$, la partie des charges totales fixes affectées à l'appareil i ;

TRecF, le total annuel des recettes fixes pour l'aéroclub en € ;

nhA_i , le nombre d'heures courant ou annuel de l'appareil A_i en heures ;

$\sum_{i=1}^N nhA_i$, le total annuel des heures de vol pour l'aéroclub en heures ;

CHE, la consommation horaire d'essence (AVGAS ou autre) en €/h ;

TChV, le total annuel des charges variables en €.

Tant que les charges fixes et les recettes affectées à chaque appareil restent proportionnelles au nombre d'heures réellement réalisées et que l'aéroclub réalise le nombre d'heures total $\sum_{i=1}^N nhA_i$ via l'ensemble de sa flotte,

les charges et les recettes, varient de manière linéaire par rapport au nombre d'heures et le tarif horaire pour le seuil de rentabilité TSR_i reste indépendant du nombre d'heures.

Les résultats précédents sont appliqués à un avion DR400 120 (annexe 1) et les calculs, réalisés sur tableur, s'effectuent à partir des rubriques, des informations et des montants reportés en annexe 2 ; les items repérés en bleu varient linéairement en fonction du nombre de membres, du nombre d'avions ou des surfaces de l'aéroclub avec :

$$Assurances = Prime \text{ bâtiments} + RC + \sum_{i=1}^N Prime \text{ Avion } A_i$$

avec RC, le montant de la prime pour l'assurance de responsabilité civile.

$$Location \text{ Hangar} = (Surface \text{ m}^2 / \text{avion} * \text{coût } \text{€}/\text{m}^2) * N$$

$$Taxes \text{ Atterrissage} = \text{taxe } \text{€}/\text{avion} * N$$

Sont alors reportés sur les figures 5 et 6 :

- les tarifs horaires TSR_i associés aux seuils de rentabilité et les heures de vol annuelles ;
- l'évolution des besoins en nombres d'avions et d'instructeurs,

pour des aéroclubs comprenant 75, 150, 200, 250 et 350 membres qui emploient 2 salariés, assurent le fonctionnement d'un club house de mêmes dimensions (200 m²), rémunèrent les mêmes services extérieurs, payent les mêmes impôts et taxes, remboursent les mêmes dettes et provisionnent les mêmes dotations **proportionnellement aux nombres de membres, d'avions ou de surfaces** (voir Annexe 2).

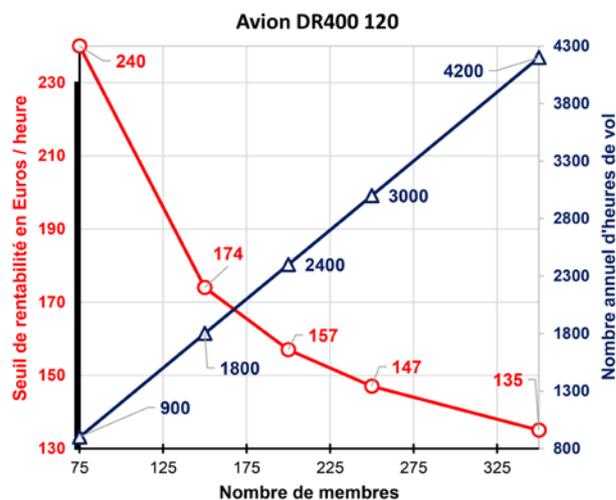


Figure 5. Seuils de rentabilité en €/h et nombre d'heures annuelles de vol en fonction du nombre de membres.

1. Configuration classique dans les aéroclubs pour les avions dont la puissance des moteurs reste inférieure ou égale à 180 ch. Dans le cas contraire, la démarche consiste à regrouper la flotte par groupe d'appareils équivalents et pondérer les affectations de charges aux coûts réels moyens de chaque groupe.

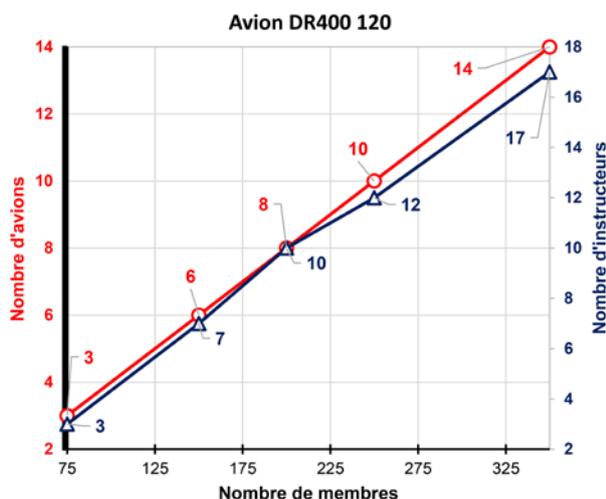


Figure 6. Besoins en nombres d'avions et d'instructeurs en fonction du nombre de membres.

Pour un aéroclub de 350 membres qui emploie 2 salariés, un mécanicien et un secrétariat, qui dispose de 14 avions et effectue 4200 heures de vol annuel, le seuil horaire de rentabilité s'élève à 135€/h (voir Figure 5). Cette valeur s'accorde avec les tarifs horaires couramment relevés sur ce type d'appareil, entre 130 et 140 €, et confirme la pertinence des valeurs retenues pour les simulations (voir Annexe 2).

Les résultats reportés sur la figure 5 montrent clairement que le tarif horaire pour le seuil de rentabilité augmente avec la réduction du nombre de membres. Ainsi, pour un aéroclub de 150 membres, qui dispose de 7 avions, effectue 1800 heures dans l'année et dispose de deux salariés pour des coûts salariaux identiques, ce seuil s'élève déjà à 174 €/h (voir Figure 5). Ce tarif engendrera une désaffection dans l'utilisation de l'appareil voire le départ d'une partie des membres vers un autre aéroclub (boucle de rétroaction positive), induira une perte au niveau du compte de résultat et nécessitera de puiser sur la trésorerie. Ces deux dernières conséquences seraient identiques si l'aéroclub choisissait de fixer un tarif horaire inférieur au tarif du seuil de rentabilité pour rester compétitif ; une configuration classique lorsque plusieurs aéroclubs de tailles différentes coexistent sur un même aérodrome. En choisissant de poursuivre son activité avec ce niveau de charge, l'aéroclub deviendra déficitaire et/ou vendra à court ou moyen termes une partie de ses actifs. La solution consiste alors à réduire un ou plusieurs des postes de charges avec ses conséquences sur le maintien des potentiels, l'attractivité de l'aéroclub et/ou les services. La comparaison de ces deux situations (aéroclubs de 350 et 150 membres) montre l'incidence de

l'effet "volume" sur l'attractivité tarifaire, les services proposés aux adhérents et confirme l'intérêt du **regroupement des petites structures** pour réduire la part des charges fixes à répartir par avion.

En pratique, chaque appareil est associé à un objectif annuel d'heures de vol qui doit conditionner la rémunération d'une partie de la totalité annuelle des charges fixes $TChF$ notée $P_i TChF$. Dans ces conditions, les débit, crédit, provisions pour charges variables (voir Annexe 2) et solde entre les produits et les charges en fonction des heures de vol réellement effectuées sont respectivement donnés par :

$$\text{Débit } A_i = \left(CHE + \frac{TChV}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right) * nhA_i + P_i TChF$$

$$\text{Crédit } A_i = \left(THDV_i (\text{€/h}) + \frac{TRecF}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right) * nhA_i$$

$$\text{Provisions Charges Variables } A_i = \left(\frac{TChV}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right) * nhA_i$$

$$\text{Solde } A_i = \left[\left[THDV_i (\text{€/h}) + \frac{TRecF}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right] - \left(CHE + \frac{TChV}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right) \right] * nhA_i - P_i TChF$$

où $THDV_i (nhA_i)$ désigne le tarif de l'heure de vol de l'avion i avec i variant de 1 à N .

Pour un aéroclub de 350 membres qui emploie 2 salariés, un mécanicien et un secrétariat, qui dispose de 14 avions et réalise 4200 heures ($\sum_{i=1}^N nhA_i$) sur l'ensemble de sa flotte (supposée homogène) dont 400 heures sur le DR400 120, sont alors reportés figures 7, 8, 9 et 10 :

- les nombres d'heures nécessaires à l'équilibre lorsque le tarif horaire d'heure de vol évolue de part et d'autre du tarif horaire de 135 € associé au seuil de rentabilité et les 400 heures permettant d'atteindre les 4200 heures annuelles sur l'ensemble de la flotte (voir Figure 7) ;
- l'évolution des débit, crédit, provision, gain avec et sans provision lorsque le tarif horaire s'identifie au seuil horaire de rentabilité (135€) établi pour un nombre annuel d'heures effectué conformément à la prévision (400 heures) (voir Figure 8) ;
- l'évolution des débit, crédit, provision, gain avec et sans provision lorsque le **tarif horaire est inférieur au tarif horaire de rentabilité** ; l'équilibre des charges et des produits s'obtient pour 676 heures (voir Figures 7 et 9) ;
- l'évolution des débit, crédit, provision, gain avec et sans provision lorsque le tarif horaire est **supérieur au**

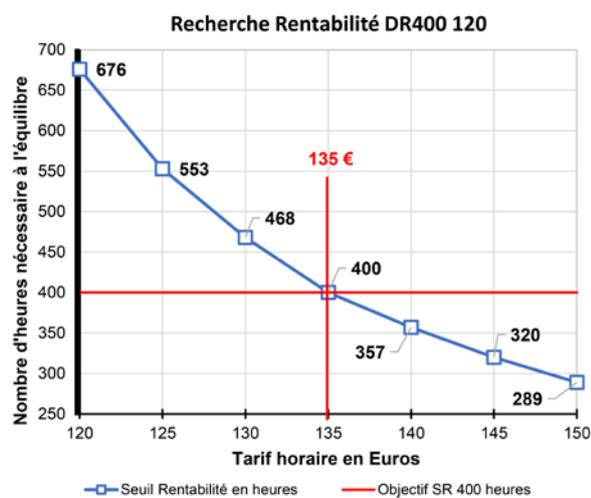


Figure 7. Évolution du nombre d'heures nécessaire à l'atteinte du seuil de rentabilité en fonction du tarif horaire. Objectif annuel fixé à 400 heures pour 350 membres et 4200 heures annuelles.

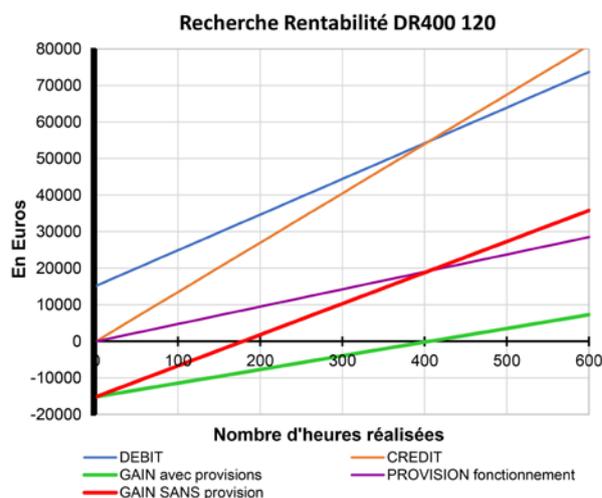


Figure 8. Débit, crédit, gain avec et sans provisions en fonction du nombre d'heures à réaliser (400) pour un tarif horaire correspondant au tarif horaire du seuil de rentabilité (135 €/h) ; 350 membres et 4200 heures.

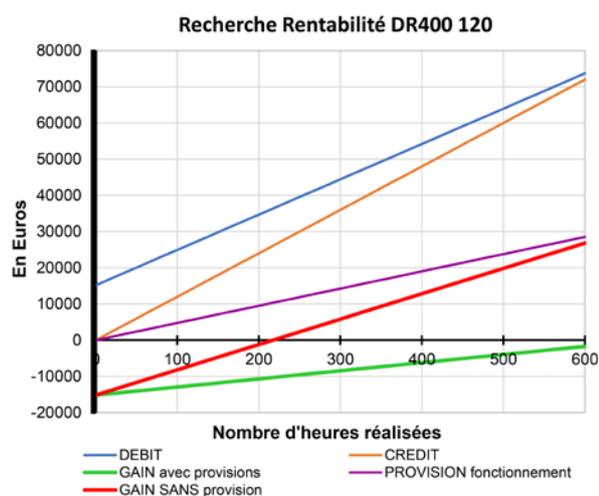


Figure 9. Tarif horaire (120 €/h) en dessous du tarif horaire du seuil de rentabilité établi à 135 € pour 400 heures de vol sur l'année : l'équilibre des charges et des recettes s'obtient au-delà des 600 heures (676 heures, voir Figure 7) ; 350 membres et 4200 heures.

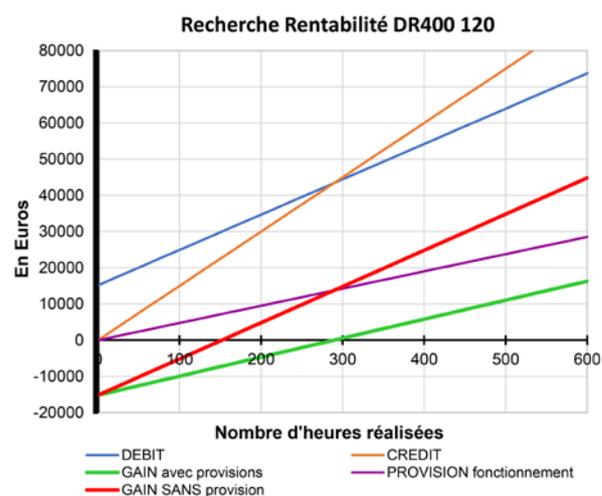


Figure 10. Tarif horaire (150 €/h) au-dessus du tarif horaire du seuil de rentabilité établi à 135 € pour 400 heures de vol sur l'année : l'équilibre des charges et des recettes s'obtient dès 289 heures (voir Figure 7) ; 350 membres et 4200 heures.

tarif horaire de rentabilité ; l'équilibre des charges et des produits s'obtient dès 289 heures et l'aéroclub est bénéficiaire au-delà de 289 heures (voir Figures 7 et 10).

Variables d'ajustement. La réduction, voire la suppression des dotations aux renouvellements des matériels et la vente d'actifs, avions et/ou locaux, condamnant le plus souvent les possibilités de rebond et/ou de développement, les salaires constituent le plus souvent une variable d'ajustement pour réussir à équilibrer les charges lorsque le nombre de membres

devient insuffisant. Le chef pilote peut être remplacé par un pilote bénévole disposant des qualifications et expériences requises (stages FI et/ou FE cofinancés), le secrétariat et par suite l'accueil très facilement assurés par plusieurs membres bénévoles disposant de temps. Le poste de mécanicien est à conserver en dernier lieu pour ne pas accroître les durées d'immobilisation des avions lors des visites techniques (50 heures, 100 heures, 500 heures...) ou lors d'incidents mineurs tels des problèmes de batterie, d'alternateur ou de crevaison.

50 heures	100 heures	500 heures	1000 heures	2000 heures
600€	700€	800€	2000	3000€

Tableau 1. Ordres de grandeurs des coûts externes de maintenance hors fournitures liquides et pièces.

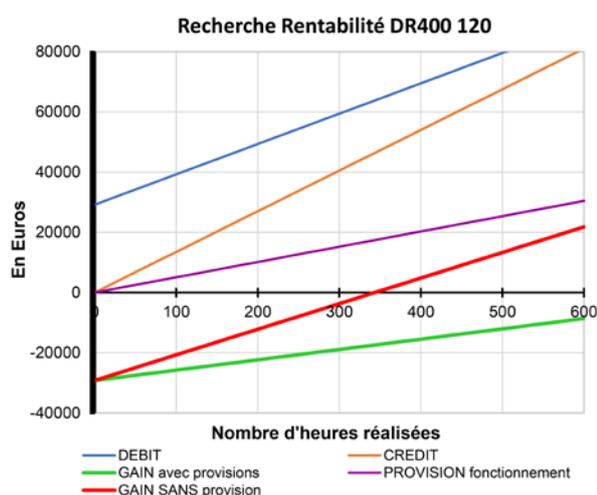


Figure 11. Tarif horaire fixé à 135 € suivant les conditions mentionnées à l'annexe 2 ; le seuil de rentabilité est reporté à 852 heures. Aéroclub de 150 membres réalisant 1800 heures de vol dans l'année.

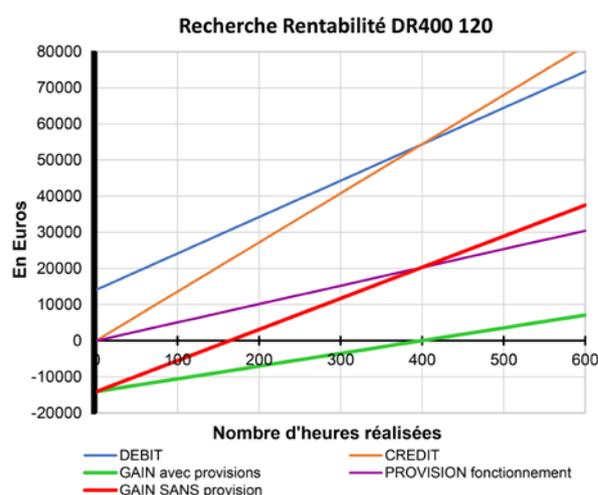


Figure 12. Tarif horaire fixé à 135 € avec réduction des charges fixes par suppression des deux postes salariés et recours à une maintenance extérieure suivant le tableau 1. Le seuil de rentabilité est atteint dès 400 heures.

Lorsque la suppression de cette activité devient nécessaire, le coût salarial ne peut enfin jamais être nul car l'activité de maintenance doit être confiée à un atelier extérieur sauf à disposer au sein de l'association d'un membre ayant les qualifications techniques et administratives requises. Si l'activité de maintenance doit être externalisée, certains organismes pratiquent des forfaits dont les ordres de grandeur sont reportés dans le tableau 1. Le coût de main-d'œuvre hors fournitures (liquides et pièces) d'un cycle de 1000 heures de vol, comprenant dix 50 heures, neuf 100 heures, une 500 heures et une 1000 heures ou une 2000 heures, revient ainsi à 15,100 € (1000 heures incluse) ou 16,100 € (2000 heures incluse).

Les résultats reportés figures 11 et 12 sont obtenus pour un aéroclub de 150 membres pour lequel sont respectivement conservées puis supprimées les charges associées à deux emplois salariés retenus pour les simulations (administratif + maintenance). Dans le cas de la figure 11, les charges de salaire rendent impossible l'atteinte d'un équilibre budgétaire sauf à fixer un tarif horaire de l'heure de vol (174 €, voir Figure 5) qui diminuera l'utilisation de l'appareil et aboutira inévitablement vers le départ des adhérents. Dans le cas de la figure 12, les deux emplois salariés sont supprimés. Les travaux de maintenance

sont confiés à une entreprise extérieure pour un coût déterminé proportionnellement aux heures effectuées et calculé sur la base de 15 k€/1000 heures de vol. L'équilibre est atteint et les recettes équilibrent les charges.

RÉSULTAT DE L'EXERCICE

Les tarifs horaires des appareils étant ajustés en fonction des meilleurs intérêts de l'aéroclub (*concurrence sur la plateforme, besoin de trésorerie, projet de renouvellement, etc.*) via l'identification des seuils de rentabilité de chaque avion, la recherche de solutions pour dégager un résultat annuel positif peut s'effectuer en faisant varier le nombre de membres, le nombre d'avions par membre, le nombre annuel d'heures de vol par membre ou le nombre de salariés. Ces variations sont alors utilisées pour identifier leurs influences sur les postes essence, assurances, fournitures, frais de fonctionnement hors salaires (*EDF, eau, etc.*), achats moteurs... et recettes. L'approche permet de rechercher des solutions d'optimisation voire de supprimer certains services via l'externalisation des opérations de maintenance ou le recours à plus de membres bénévoles (*secrétariat, maintenance*).

VIE 3AF ÉLÉMENTS DE PILOTAGE D'AÉROCLUB

Son expression est donnée par :

$$Résultats (\epsilon) = \sum_{l=70}^{75} Produits (l) - \left(Amortissements + \sum_{k=60}^{68} Charges (k) \right)$$

où chaque poste de charge et de produit est donné ou calculable à partir des informations reportées en Annexe 2. La relation précédente, retranscrite sur tableur, permet alors toutes les simulations. **Le nombre de membres étant la variable qui conditionne toutes les autres** (nombre d'avions par membre, nombre d'heures de vol, etc.), l'analyse qui suit porte essentiellement sur cette variable.

La simulation s'effectue sur la base d'un tarif horaire moyen de l'heure de vol défini au prorata des heures effectuées sur chaque appareil sur une année de référence défini par :

$$Tarif\ moyen\ HDV(\epsilon) = \left(\frac{\sum_{i=1}^N nhA_i * Tarif\ hdv_i}{\sum_{i=1}^N nhA_i} \right)$$

avec $Tarif\ hdv_i$, le tarif de l'heure de vol de l'appareil i avec i variant de 1 à N au moins égal au tarif horaire du seuil de rentabilité de chaque avion.

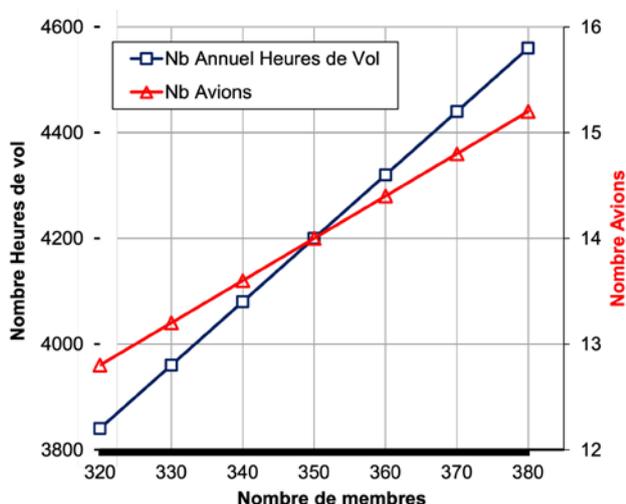


Figure 13. Évolutions du nombre d'heures et du besoin en nombre d'avions en fonction du nombre de membres.

Les résultats reportés figures 13 et 14 sont obtenus en faisant varier le nombre de membres autour d'une valeur moyenne fixée à 350 pour les conditions reportées à l'Annexe 2 (colonne 350 membres) et un tarif horaire moyen de 150 €. L'aéroclub dispose de 2 salariés, un mécanicien et un secrétariat, de 14 avions, fonctionne sur la base de 25 membres par avion et effectue en moyenne 4200 heures (12 h/an/membre) dans l'année pour une consommation horaire moyenne de 25 litres et un prix du litre d'AVGAS fixé à 2€.

Les évolutions du nombre total d'heures de vol et du besoin d'avions sont reportées Figure 13. Le résultat du compte de résultat hors amortissement pour 350 membres est positif et égal à 49,950 €² et les variations en fonction du nombre de membres, avec (Résultat 2S) et sans salariés (Résultat 0S) sont reportées Figure 14. Pour les configurations et les modèles linéaires d'évolution de charges variables retenus en Annexe 2, le taux de variation du résultat par membre est proche de 700 €. Toute variation d'un nombre L de membres entraîne alors une augmentation ou réduction de $L*700$ € sur le compte de résultat ; soit 21 k€ pour 30 membres (10% d'un effectif de 300 membres³) ou l'équivalent d'un emploi de secrétariat à mi-temps.

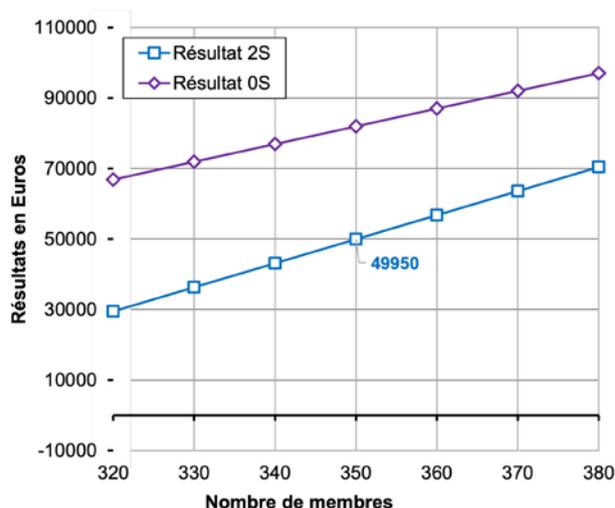


Figure 14. Évolution du résultat en fonction du nombre de membres.

2. Valeur issue du calcul suivant l'annexe 2 ; à considérer, comme tous les résultats, en ordre de grandeur.

3. Pourcentage inférieur au taux de départ ou d'entrée (turn-over) dans les aéroclubs compris entre 20 et 30% [3].

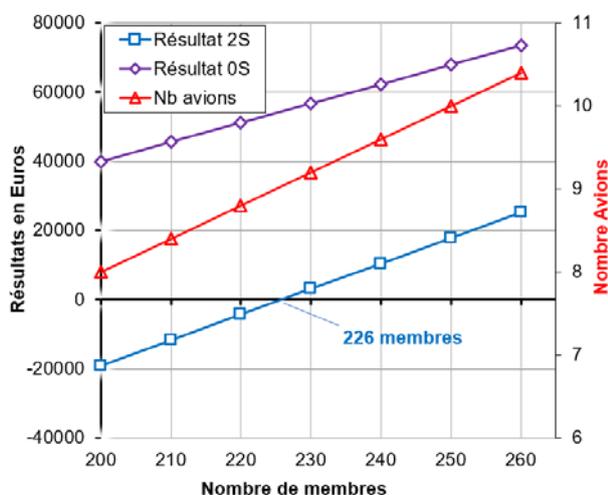


Figure 15. Évolution du résultat en fonction du nombre de membres suivant les conditions de l'annexe 2.

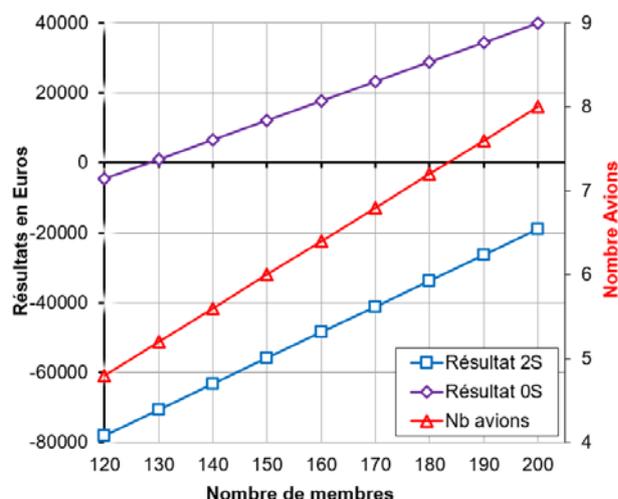


Figure 16. Évolution du résultat en fonction du nombre de membres suivant les conditions de l'annexe 2.

2S avec deux salariés (maintenance et administratif), OS sans salarié.

Les résultats, reportés Figures 15 et 16, mettent clairement en évidence l'érosion du résultat avec la diminution du nombre de membres qui passe en négatif pour 226 membres, valeur pour le point mort⁴, justifiant ainsi la nécessité de réduire la dotation au renouvellement, rechercher des solutions de partenariat ou de regroupement d'associations et/ou de revoir le niveau des services en faisant appel à la sous-traitance pour la maintenance et/ou à plus de bénévolat pour l'administratif. À noter cependant que la réduction de la dotation au renouvellement induira à terme une augmentation des durées d'indisponibilités et des dépenses d'entretien sur des matériels vieillissants et de plus en plus obsolètes (boucle de rétroaction positive). L'équilibre autour du point mort (226 membres) reste précaire mais acceptable momentanément si le niveau de trésorerie est suffisant pour pallier à des dégâts matériels, des météos défavorables ou un environnement fortement concurrentiel.

CONCLUSION

Des ordres de grandeur sur l'activité d'aviation légère sont donnés pour positionner le fonctionnement annuel moyen d'un aéroclub en termes de nombres de membres, d'heures de vol et d'appareils. Les statistiques font apparaître de fortes disparités en fonction des proximités des grandes métropoles et une diminution progressive du nombre moyen d'heures effectuées chaque année par pilote (14,9 h en 2000 pour 12,6 h en 2018).

Le principe de détermination du tarif horaire du seuil de rentabilité d'un appareil, défini à partir du nombre d'heures où les recettes deviennent suffisantes pour couvrir l'ensemble des dépenses qui lui sont affectées, est rappelé puis appliqué à un appareil de type DR400 120 utilisé dans des aéroclubs comprenant respectivement 75, 150, 200, 250 et 350 membres. Les résultats montrent clairement que les services proposés par un aéroclub de 350 membres ne peuvent plus être proposés par un aéroclub de 150 membres qui doit réduire le niveau de ses charges fixes pour équilibrer son compte de résultat. Cette réduction peut s'effectuer en supprimant des dotations aux renouvellements des matériels ou en vendant des actifs. Ces solutions condamnant le plus souvent les possibilités de rebond et/ou de développement, la réduction du nombre de salariés sur des activités qui peuvent être relayées par des bénévoles, constitue le plus souvent la meilleure variable d'ajustement.

Les tarifs horaires des appareils étant ajustés en référence au tarif horaire du seuil de rentabilité de chaque avion, des simulations peuvent alors être effectuées sur le compte de résultat pour rechercher les meilleurs compromis entre la flotte et les services en faisant varier le nombre de membres, le nombre d'avions, le nombre d'avions par membre, le nombre annuel d'heures de vol par membre ou le nombre de salariés. Pour les conditions retenues et une analyse centrée sur la variation du nombre de membres, le point mort de l'exercice se situe autour

4. Point mort : désigne l'instant où l'association atteint son seuil de rentabilité, le moment où les pertes équilibrent juste les recettes.

de 225 membres. En dessous, l'aéroclub est déficitaire et doit réduire ses charges fixes. Les résultats obtenus montrent la forte influence du nombre de membres sur l'attractivité tarifaire, les services proposés aux adhérents et confirment l'intérêt du regroupement des petites structures.

Références

[1] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/chiffres_federaux.pdf

[2] https://aeral.dg.aviation-civile.gouv.fr/AERAL_WEB/FR/ConsAnnuaireAvion.awp?A6&Zone=0

[3] <https://www.aerovfr.com/2014/12/la-flotte-des-aero-clubs/>

ANNEXE 1

*Avion de référence à moteur thermique,
avion ROBIN DR400 120.*

Envergure (m)	8,72
Longueur (m)	6,96
Surface alaire (m ²), pour corde 1 m	13,6
Masse à vide / maxi (kg)	550 / 900
Puissance du moteur (kW)	86
Autonomie (litres)	110
Vitesse de rotation / croisière (km/h)	100 / 200
Cx / Cz (croisière, $\sigma=0,75$ (puissance 75%))	0,036 / 0,343
Finesse en croisière	9,3
Vitesse maximale / en finale (km/h)	240 / 120
Cx (en lisse, $\sigma=10\%$, pente -4°) estimé	0,824
Cz (en lisse, pente -4°) estimé	0,952
Date du premier vol	1975

RECHERCHE SEUIL RENTABILITE AVION DR400 120

PARAMETRES CLUB

Nb de membres actifs (qui payent) :	350	250	200	150	75
Nb de membres actifs / avion :	25	25	25	25	25
Nb élèves (20% du nb total de membres) :	70	50	40	30	15
Base nb heures/membre/an :	12	12	12	12	12
Base nb heures/élève/an :	15	15	15	15	15
Base horaire annuel vol :	4200	3000	2400	1800	900
Nb heures élèves :	1050	750	600	450	225
Nombre instructeurs (1 inst /20 mbres) :	17	12	10	7	3
Tarif double élève € :	18	18	18	18	18
Coût essence en € :	2	2	2	2	2
Assurance RC + bâtiment(s) en € :	4000	4000	4000	4000	4000
Surface hangar(s) en m2/avion :	100	100	100	100	100
Cout location ADP €/m2 :	11	11	11	11	11
Forfait taxe atterrissage / an en €/avion :	800	800	800	800	800

PARAMETRES AVION

Nb heures avion mini à faire / an :	400	400	400	400	400
Prix HDV avion en € :	135	147	157	174	240
Consommation horaire € :	25	25	25	25	25
Assurance par AVION en €/an :	3500	3500	3500	3500	3500
Nb avions aéroclub :	14,0	10,0	8,0	6,0	3,0
Nb heures amortissement hélice :	2000	2000	2000	2000	2000
Nb heures amortissement moteur :	2000	2000	2000	2000	2000

CHARGES FIXES :

60 ACHATS	10000	10000	10000	10000	10000
Fournitures, entretien club	5000	5000	5000	5000	5000
Fournitures, fuel, eau, électricité	4000	4000	4000	4000	4000
AVGAS (CHV pour Charges Variables)					
Fournitures administratives	1000	1000	1000	1000	1000
Variation de stock					
61 SERVICES EXTERIEURS	83800	61000	49600	38200	21100
Assurances avions, RC et hangars	53000	39000	32000	25000	14500
Documentation technique (200€/avion) :	2800	2000	1600	1200	600
Entretien & réparation avions (CHV)					
Entretien des locaux (1€/m2/an) :	1400	1000	800	600	300
Location hangar(s), taxes atterrissage (ADP)	26600	19000	15200	11400	5700
62 AUTRES SERVICES EXTERIEURS	28400	20500	16800	12600	6550
Frais postaux, Internet, Tel, Aerogest (30€/mb) :	10500	7500	6000	4500	2250
Services bancaires, commissions, ANCV	1000	1000	1000	1000	1000
Frais instructions (ind. Kms, 500€/an/inst) :	8500	6000	5000	3500	1500
Abondements, remises (3€/membre) :	1050	750	600	450	225
Frais divers (entretien 5€/m2 hangar) :	7000	5000	4000	3000	1500
Réceptions (1€/mb/an) ;	350	250	200	150	75
63 IMPOTS & TAXES	4800	3600	3000	2400	1500
Taxes foncières (3€/m2) (club house 200 m2) :	4800	3600	3000	2400	1500
64 CHARGES PERSONNELS	95000	95000	95000	95000	95000
Cout annuel salaire secretariat chargé :	35000	35000	35000	35000	35000
Cout annuel salaire mécanicien chargé :	60000	60000	60000	60000	60000
Coût annuel salaire chef pilote chargé :	0	0	0	0	0
Coût horaire salaire secrétariat chargé :	8,33	11,67	14,58	19,44	38,89
Coût horaire salaire mécanicien chargé :	14,29	20,00	25,00	33,33	66,67
Coût horaire salaire chef pilote chargé :	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65 INTERETS D'EMPRUNTS	0	0	0	0	0
66 DETTES (50€/membre) :	17500	12500	10000	7500	3750
68 DOTATION RENOUELEMENT FLOTTE (50€/mbr) :	17500	12500	10000	7500	3750
Total charges fixes à répartir :	257000	215100	194400	173200	141650

ÉLÉMENTS DE PILOTAGE D'AÉROCLUB

CHARGES VARIABLES

Coût hélice neuve € (si loué = 0€) :	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
Coût moteur remanufacturé € (si loué = 0€) :	35000,00	35000,00	35000,00	35000,00	35000,00
Coût imprévu (incidents divers...) € :	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00
Pièces, liquides, maintenance/avion/an :	8000,00	8000,00	8000,00	8000,00	8000,00
Pièces, liquides, maintenance / an € :	112000,00	80000,00	64000,00	48000,00	24000,00
<i>Provision hélice €/h :</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>
<i>Provision moteur €/h :</i>	<i>17,50</i>	<i>17,50</i>	<i>17,50</i>	<i>17,50</i>	<i>17,50</i>
<i>Provision imprévu €/h :</i>	<i>2,38</i>	<i>3,33</i>	<i>4,17</i>	<i>5,56</i>	<i>11,11</i>
<i>Pièces, liquides, maintenance €/h :</i>	<i>26,67</i>	<i>26,67</i>	<i>26,67</i>	<i>26,67</i>	<i>26,67</i>
<i>Total horaire charges variables €/h :</i>	<i>47,55</i>	<i>48,50</i>	<i>49,33</i>	<i>50,72</i>	<i>56,28</i>

RECETTES

Cotisations + Assu casse brevetés :	235,00	235,00	235,00	235,00	235,00
Cotisations + Assu casse élèves :	185,00	185,00	185,00	185,00	185,00
Entretien compétences brevetés :	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Recettes cot+ Ass Casse + Ent Compéte.	78750,00	56250,00	45000,00	33750,00	16875,00
Tarif permanence (remboursable) :	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Retour permanences (1 mb sur 2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vols "Découverte" :	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Location emplacements hangar :	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Retour formation élèves (€/h)	18900,00	13500,00	10800,00	8100,00	4050,00
Retour maintenance extérieure :	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total recettes Fixes à répartir :	97650	69750	55800	41850	20925

- Les items repérés en bleu varient linéairement en fonction du nombre de membres, du nombre des avions ou des surfaces de l'aéroclub.
- Les valeurs reportées dans ce tableau sont des ordres de grandeur qui s'appuient sur des valeurs réelles relevées en 2020 dans un aéroclub installé sur un aérodrome dépendant du Groupe ADP. ■

HISTORIQUE DES KÉROSÈNES

par Mickaël Sicard, ONERA

LES ORIGINES

Autant l'essence aviation est indéfectiblement liée aux moteurs à pistons, autant le kérosène est lié aux turbomachines. Ces dernières apparaissent en pleine Deuxième Guerre mondiale. Bien que le principe de la turbomachine soit connu depuis le début du 20^{ème} siècle, son véritable essor n'a eu lieu que dans la fin des années 30 en Angleterre et en Allemagne avec les travaux de, respectivement, Frank Whittle et de Hans von Ohain [1]. Le moteur de ce dernier fonctionnait alors à l'hydrogène. Au cours de la Seconde Guerre mondiale, les différents développements ont abouti à deux biréacteurs : le Gloster Meteor côté anglais et le Messerschmitt 262 côté allemand. Ce dernier utilisait comme carburant un gasoil. Alors que l'effort de guerre nécessitait que chaque goutte d'essence soit utilisée pour les avions, la question se posait de savoir quel carburant serait disponible pour ces nouveaux moteurs ? Ils étaient considérés comme plutôt insensibles aux propriétés du carburant, toutefois, le carburant ne devait pas être trop visqueux et devait avoir un point de disparition des cristaux suffisamment bas, ce qui écartait d'office les gasoils [1,2]. Le choix s'est ainsi porté sur le kérosène lampant, produit peu onéreux, qui était utilisé dans les lampes à pétrole et qui présentait aussi l'avantage d'être disponible en quantités suffisantes [3]. Par ailleurs, Whittle aurait préféré le kérosène au gazole en raison du point de disparition du dernier cristal (*freezing point*) plus bas. Ainsi, en 1943 paraît la norme anglaise RDE/F/KER/210 qui décrit un kérosène lampant avec un point de disparition du dernier cristal à -40 °C [1]. Elle sera remplacée par la norme DERD 2482 à partir de 1947 [4]. Elle imposera notamment des teneurs maximales de 12 % et 0,1 % mass., respectivement, en aromatiques et en soufre et un pouvoir calorifique supérieur au minimum à 43,03 MJ/kg.

LE DÉVELOPPEMENT DES CARBURANTS « COUPES LARGES »

L'arrivée d'avions équipés de turbines plus puissantes, leur permettant d'évoluer à des altitudes plus élevées et avec des rayons d'action importants, nécessitera un

carburant avec un point de disparition du dernier cristal plus bas qui sera imposé à -50 °C en 1957 par la norme DERD 2494 [5]. Du côté américain, la norme AN-F-32a, datée de 1944, décrit un kérosène avec un point d'éclair à 43,8 °C et un point de disparition du dernier cristal à -60 °C, soit la même valeur que pour l'essence aviation [2]. Cette norme deviendra en 1950 la MIL-F-5616 et le carburant sera nommé JP-1 pour « Jet Propellant » [1]. La faible volatilité de ce carburant posait des problèmes car au-dessus de 10 000 mètres, il était difficile de maintenir une combustion stable avec ces premières turbomachines. L'extinction et les difficultés de rallumage des réacteurs se produisaient plus souvent avec le JP-1 qu'avec l'essence aviation [1]. De plus, un point de disparition du dernier cristal aussi bas limitait les volumes disponibles en JP-1, c'est pourquoi en 1945 fut proposé un carburant dit à « coupe large » ou « wide cut ¹ », nommé AN-F-34 puis JP-2 afin d'augmenter les volumes de carburant disponibles et obtenir une volatilité plus importante [2]. Cependant des problèmes d'inflammabilité et de viscosité limitèrent son utilisation aux bancs d'essais et aux prototypes [1,4].

Pour trouver un successeur au carburant JP-2, le sous-comité « carburants aviations » du *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) lança, en 1946 [1], une étude sur deux carburants prototypes :

- le carburant A, un mélange d'essence aviation et de kérosène, à coupe large ;
- le carburant B, proche du JP-1 avec un point d'éclair de 43,3 °C.

Le carburant A deviendra le carburant AN-F-58a en 1947 et changera encore de nom en 1950 pour devenir le JP-3 quand il intégrera la norme MIL-F-5624. Cependant, la haute volatilité de ce carburant, notamment lors des montées rapides, fut à l'origine de phénomènes de vaporisation partielle (« boil-off ») et de poches de gaz (« vapor lock » ²) [4]. Pour limiter ce phénomène, il fut décidé de modifier sa plage de distillation afin de passer d'une pression de vapeur de 35-49 kPa (5-7 psi) à 14-21 kPa (7 à 3 psi) [1,5].

1. Un carburant sera dit à « coupe large » lorsque sa plage de distillation en température sera importante et englobera, dans ce cas, celles de l'essence et du kérosène.

2. Le « vapor lock » est la formation de poches de vapeurs de carburant dans la pompe ou la tuyauterie, surtout lorsque ces derniers sont exposés à la surchauffe d'une partie du moteur. Ces poches gazeuses empêchent le passage normal du carburant par intermittence, voire complètement.

HISTOIRE HISTORIQUE DES KÉROSÈNES

Ce nouveau carburant à « coupe large » est composé d'environ 50 à 60 % d'essence aviation et le reste de kérosène. Il sera utilisé à partir de 1950 par l'USAF et intégrera la norme MIL-F-5624 sous le nom de JP-4. Des critères de disponibilité orienteront aussi ce choix. En effet, avoir une plage de distillation aussi étendue permettait d'avoir des volumes de carburant plus importants qu'un produit qui aurait été centré sur l'essence aviation ou le kérosène [1]. Afin de maintenir une interopérabilité avec les Américains, les Britanniques mirent en place la norme DERD 2486 en 1951, le carburéacteur « AVTAG », *AViation Turbine Gasoline*, étant l'équivalent au JP-4. Celle-ci évoluera encore en DERD 2454 (aujourd'hui Def Stan 91/88) avec l'ajout d'additifs anti-glace et anti-corrosion en 1967 [5].

Le carburéacteur JP-4 présentait certains inconvénients liés à la présence d'hydrocarbures légers comparé au kérosène avec notamment :

- des pertes par évaporation importantes à haute altitude ;
- des risques significatifs de départ de feu durant les phases de manipulation au sol et lors de crashes d'avions.

LES CARBURANTS À HAUTS POINTS D'ÉCLAIR

Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, la NAVY utilisait, de son côté, l'essence d'aviation pour ses premiers avions équipés de turbomachines. Elle s'est très rapidement rendue compte que le plomb contenu dans l'essence détériorait certaines sections chaudes du moteur. L'approche suivie pour remédier à ce problème fut encore de mélanger de l'essence d'aviation avec une coupe kérosène (norme MIL-F-7914 en date du 11 mars 1952) [4]. La coupe kérosène avait été spécialement développée pour la NAVY et présentait la spécificité d'avoir un haut point d'éclair (60 °C) afin de limiter les incendies sur le pont d'envol. Ce kérosène, le JP-5, fut décrit pour la première fois dans la norme MIL-F-5624 de décembre 1953 [4]. La NAVY se rendit compte que ses avions volaient très bien avec le JP-5 seul et abandonna le mélange avec l'essence aviation. Pour maximiser la disponibilité du JP-5, la NAVY fit le choix de fixer le point de disparition du dernier cristal à environ -45 °C, température relativement haute comparée au -60 °C de l'essence aviation. Cela n'handicapait pas les missions des avions aéroportés, généralement plus courtes. Par

ailleurs, l'environnement marin limitait l'apparition de très basses températures qui pouvaient être rencontrées sur terre [4]. L'année 1952 est marquée par l'équivalent anglais du JP-5, « l'AVCAT », *AViation Carrier Turbine*, défini dans la norme DERD 2488 [2]. Ce carburant avait un point de disparition du dernier cristal de -40 °C. Ce dernier étant jugé trop haut, cette norme fut remplacée par la DERD 2498 en 1960 avec un point de disparition du dernier cristal à -48 °C, mais qui sera relevé à -46 °C en 1966 [5]. Enfin, en 1979, la norme dérivant « l'AVCAT » sera remplacée par la DERD 2452, aujourd'hui Def Stan 91/86, afin d'obtenir une équivalence avec les normes américaines et OTAN. Il est à noter que le JP-5 est toujours utilisé. Il existe aussi sous la dénomination OTAN F-44 et est décrit par la norme militaire française DCSEA 144.

Les avions capables d'effectuer des vols supersoniques firent leur apparition dès les années 47 avec le Bell X-1. Il y eut ensuite le Douglas D-558 II Skyrocket, en 1949, le YF-100 A en 1953 et le B-58 en 1956. Compte tenu de la forte consommation des moteurs, notamment avec la postcombustion, les vols supersoniques étaient relativement courts. Les débits de carburant étaient tels qu'il était donc possible de voler avec le JP-4 car, bien qu'utilisé comme liquide de refroidissement, le point de « boil-off »³ n'était pas atteint [1]. Pour l'avion XB-70, l'USAF développa un nouveau carburant pour éviter cet écueil lors des vols de longue durée. Le JP-6 est ainsi issu d'une coupe kérosène comme le JP-5 mais il avait un point de disparition du dernier cristal plus bas et une stabilité thermique améliorée. Ce carburant était décrit dans la norme MIL-F 25656 de 1956 [1][4]. Sa pression de vapeur saturante était de 34,5 mbar (0,5 psi) à environ 38 °C contre 207 mbar (3 psi) pour le JP-4. L'arrêt du développement du XB-70 ainsi que la faible disponibilité du JP-6 par rapport au JP-4 furent à l'origine de son abandon [1].

LE DÉBUT DE L'AVION COMMERCIALE ET LE DÉVELOPPEMENT DES NORMES CIVILES

Lorsque l'aviation commerciale se développe dans les années 50, un carburéacteur de type kérosène est choisi car il présente le meilleur compromis entre les propriétés physico-chimiques, la disponibilité et le coût. L'année 1958 marque le début de l'ère du Jet et des vols transatlantiques avec le Boeing 707 et le DH Comet 4. Le kérosène utilisé répondait à une version modifiée de la norme DERD-2482 avec notamment un point de

3. BOG (Boil Off Gas) : tout apport de chaleur dans un équipement ou une installation qui contient du GNL conduit à sa vaporisation partielle appelée « boil off gas » ou « gaz d'évaporation ». S'il n'est pas évacué, le BOG s'accumule, entraînant ainsi une montée en pression.

disparition des cristaux abaissé. Le problème de la précipitation d'hydrocarbures à cause de la faible valeur de la température atteinte par le carburéacteur au cours de ces vols long courrier est très rapidement devenu un sujet d'inquiétude. Au terme d'études spécifiques les américains comme les britanniques furent convaincus qu'un carburéacteur avec un point de disparition des derniers cristaux de -50 °C ne poserait pas de problèmes opérationnels [1].

Pour assurer une qualité constante du produit, il fallait définir une norme dans le domaine civil. Ce travail de mise en place a été réalisé entre 1955 et 1959 par l'ASTM. Il est réalisé aussi en parallèle dans le groupe d'étude sur les carburants de l'IATA dès 1957 [4]. À partir de 1958, l'ASTM décrira dans la norme ASTM D1655 les kérosènes Jet A, Jet A-1 et Jet B. Cette norme s'est inspirée des normes militaires déjà existantes, des propriétés du kérosène lampant et de la philosophie générale de la norme sur les essences aviation de l'ASTM D910 [6]. L'équivalent britanniques sera la norme DERD 2494 (renommée aujourd'hui DEF STAN 91-091). Le Jet A-1 de l'époque avait un point de disparition du dernier cristal à -50 °C , une teneur maximale en aromatique de 20 % et un point de fumée à 20 mm min. [6,7]. Il est intéressant de noter que les Britanniques firent le choix de donner la responsabilité des carburants civils et militaires au ministère de la Défense alors que pour les Américains, ces normes sont gérées par deux organismes différents : logiquement la Défense pour les carburéacteurs militaires et l'ASTM International pour les carburéacteurs civils. Entre 1960 et 1972, de nombreuses méthodes de caractérisation ont été développées afin de mesurer les propriétés physico-chimiques nécessaires aux besoins spécifiques de l'aéronautique. L'objectif n'était pas d'augmenter la disponibilité du carburant. Il est intéressant de noter que certaines valeurs des propriétés étaient fixées suite à étude. Par exemple, 100 % des carburants en 1962 comportaient moins de 3,0 % de naphthalènes. La valeur maximale autorisée de ce composé fut ainsi fixée dans la norme. Suite aux chocs pétroliers de 1973 et 1979, il a fallu, afin d'augmenter la disponibilité des volumes de kérosène, relâcher certaines contraintes au niveau des propriétés. Ainsi des propriétés comme la teneur en aromatiques, ainsi que les points de disparition du dernier cristal et de fumée ont vu leurs valeurs évoluer pour le Jet A-1 et devenir respectivement : 25 % min, -47 °C et 18 mm min.

Il est à noter que le carburéacteur Jet B « à coupe large » sortira de la norme ASTM D1655 et sera décrit dans la norme ASTM D6615. Aujourd'hui, ce carburéac-

teur est très peu utilisé mais il l'aurait été pendant très longtemps au Canada et en Alaska, car mieux adapté aux conditions froides.

CARBURANTS SPÉCIAUX

Le développement d'avions militaires avec des missions très particulières nécessita la mise au point de carburants spécifiques. Ainsi apparurent :

- le JPTS (*Jet Propellant Thermally Stable*) pour l'avion de reconnaissance Lockheed U-2 volant à très haute altitude, jusqu'à 21 000 m. Ce carburant devait avoir, entre autres, un bas point de disparition du dernier cristal, -53 °C (-64 °F) et une bonne stabilité thermique [7]. D'ailleurs pour cette dernière propriété, un additif spécifique, le JFA-5, était systématiquement ajouté [4] ;
- le JP-7 pour le SR-71 Blackbird. Cet avion volait à plus de Mach 3 et aussi à très haute altitude. Les propriétés requises pour ce carburéacteur étaient une faible pression de vapeur saturante, une excellente stabilité thermique et un pouvoir calorifique élevé. Ce cahier des charges strict limitait la composition possible aux alcanes et aux cycloalcanes [7]. Il en résulta un produit avec une température de point de disparition du dernier cristal relativement élevée : -43 °C (-46 °F) [4]. Ce n'était pas vraiment un problème dans le cadre de cette application où le vol à vitesse supersonique engendrait des échauffements aérodynamiques qui permettaient de maintenir le carburéacteur à une température suffisamment élevée. Il est à noter que le JP-7 n'était pas issu d'une coupe de distillation du pétrole mais d'un assemblage de bases pétrolières très propres [4]. Il contient donc très peu d'espèces avec des hétéroatomes, ce qui améliore fortement sa stabilité thermique mais réduit son pouvoir de lubrification. Un additif était ainsi rajouté pour limiter l'usure prématurée des pompes. La première version de la norme du JP-7, MIL T-38219, date de 1970 [1].

L'ABANDON DU JP-4 AU PROFIT DU JP-8

Le retour d'expérience de la guerre du Vietnam a révélé que les pertes de l'USAF, utilisant du JP-4, étaient plus élevées que celles de la NAVY, utilisant du JP-5 [4]. La volatilité plus importante du JP-4 a été mise en cause avec notamment le départ systématique d'un incendie lors d'un crash d'avion [1]. La coupe kérosène se révélait ainsi plus sûre que la « coupe large ». Le JP-8, une coupe kérosène, fut spécifiée pour remplacer le JP-4. La première spécification du JP-8, la MIL-DTL-83133, est parue en 1968 [2]. Ce fut fait dès 1967 par les Britanniques

HISTOIRE HISTORIQUE DES KÉROSÈNES

avec la DERD 2453 (aujourd'hui nommée DEF STAN 91/87), ce carburéacteur sera dénommé « l'AVTUR ». Aviation TURbine. Pour mémoire, ce carburant est très proche du Jet A-1 commercial, la différence étant principalement l'ajout d'un additif anti-glace. Il fallut 15 ans, de 1979 à 1994, pour convertir l'ensemble de la flotte de l'USAF à ce nouveau carburéacteur [4]. Afin de simplifier sa chaîne logistique, l'armée américaine a décidé de convertir ses véhicules terrestres (camions, chars d'assaut, etc.) et ses autres équipements (générateurs, etc.) au JP-8 et donc d'en faire le carburant unique du champ de bataille [4]. Cela s'accompagne de quelques difficultés avec, par exemple, l'indice de cétane du JP-8 qui est assez bas, ce qui peut être une source de problème pour les véhicules diesel. Un additif améliorateur de cétane peut être ajouté. Dans les années 1980, le JP-8 et son équivalent « AVTUR » verront leur point de disparition du dernier cristal fixé à -47°C comme celui du Jet A-1 par ailleurs. Dans le même temps, le JP-8 est devenu le carburéacteur de référence pour l'OTAN sous l'appellation F-34 et il est décrit dans la norme STANAG 3747. Il existe aussi une norme française militaire, la DCSEA 134, pour le même produit.

LE JP-8+100

En 1988, les forces armées américaines, notamment l'USAF et la NAVY, ont lancé un programme de recherche, *Integrated High Performance Turbine Engine Technology* (IHPTET), afin d'améliorer les performances des turbomachines mais aussi de réduire les coûts de maintenance. Afin d'augmenter la poussée, une des idées était d'augmenter le taux de compression du moteur [8,9]. Cela génère des flux thermiques beaucoup plus importants qui, en plus d'impacter la chambre de combustion, vont augmenter la température du carburéacteur en entrée moteur. Il faut rappeler que la stabilité thermique est une propriété importante car le carburant joue aussi le rôle de liquide de refroidissement. Lorsqu'un hydrocarbure est soumis à un stress thermique, combiné à la présence de dioxygène dissous, il peut se dégrader et former des solides carbonés qui iront se déposer dans le système carburant, les vannes, les actuateurs, les injecteurs, etc., ce qui peut aller jusqu'à engendrer des dysfonctionnements. Afin d'éviter cet écueil, il est admis que la température en entrée moteur ne doit pas dépasser 163°C (325°F). Or, pour remplir l'objectif fixé par le programme IHPTET, il fallait atteindre des températures plus élevées. L'idée fut alors d'augmenter la stabilité thermique du carburant JP-8 de 100°F , jusqu'à 425°F , soit 218°C . Cela permettrait alors au carburant de supporter une charge thermique supérieure de 50% sans dégradation supplémentaire. Pour ce faire, un ensemble de trois additifs, un

dispersant, un détergent et un antioxydant sont ajoutés au JP-8 qui devient alors le JP-8+100. Chaque additif ayant pour fonction, respectivement de, maintenir les précurseurs carbonés en suspension, nettoyer les parois du circuit carburant et enfin prévenir l'action du dioxygène sur les hydrocarbures. De nombreuses études ont été réalisées sur le JP-8+100. L'ajout d'additif a forcément un coût et l'idée était de limiter l'augmentation à 0,1 cent/gallon. Ce surcoût était compensé par la réduction des coûts de maintenance, tout en profitant de la capacité thermique améliorée des carburants en concevant des moteurs plus performants [10].

AUTRES CARBURANTS SPÉCIAUX

Pour terminer avec les carburants de type « JP », il existe encore les JP-9 et JP-10, ils ont été développés pour des applications liées aux missiles hypersoniques (vitesse de vol supérieure à Mach 5). Ce sont des carburants dits endothermiques qui refroidissent les parois des moteurs par craquage, ce qui nécessite qu'ils soient chauffés dans le circuit carburant à des températures supérieures à 400°C . Ils se décomposent alors en plus petites molécules qui sont ensuite injectées dans le moteur. Cette réaction de craquage, qui se produit sous le simple effet de la chaleur mais qui peut aussi être favorisée par des catalyseurs, est fortement endothermique [7].

Références

- [1] – W. G. Dukek, D. R. Winans, A. R. Ogston – *Milestones in Aviation Fuels*
- [2] – E. M. Goodger, R. Vere, *Aviation Fuels Technology*
- [3] – *Aviation Fuels technical Review – Chevron*
- [4] – C. Martel, *Military jet Fuels 1944 – 1987, AFWAL-TR-87-2062, nov. 1987*
- [5] – *Significance of Tests for Petroleum Products, Kenneth Boldt*
- [6] – C. P. Henry, *ASTM Turbine Fuel Specification ASTM D1655, Cranfield/MOD first International Symposium on Aviation Turbine Fuel Specification, sept 1988*
- [7] – E. M. Goodger, *An Overview of Jet Fuel Supply and Quality, Landfall Press, 1994*
- [8] – S. P. Heneghan, S. Zabarnick, D. R. Ballal, W. E. Harrison, 1996, "JP-8_100: The Development of High Thermal Stability Jet Fuel," Paper No. AIAA 96-0403.
- [9] – T. Edwards, B. Harrison, S. Zabarnick, M. DeWitt, C. E. Bentz, 2004, "Update on the Development of JP-8+100," Paper No. AIAA 2004-3886.
- [10] – T. Edwards, *Advancements in Gas Turbine Fuels From 1943 to 2005, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Janv. 2007, vol. 129, pp. 13-20* ■

STABILIZATION AND DYNAMIC OF PREMIXED SWIRLING FLAMES PREVAPORIZED, STRATIFIED, AND FULLY PREMIXED REGIMES DE PAUL PALIES AUX ÉDITIONS ACADEMIC PRESS

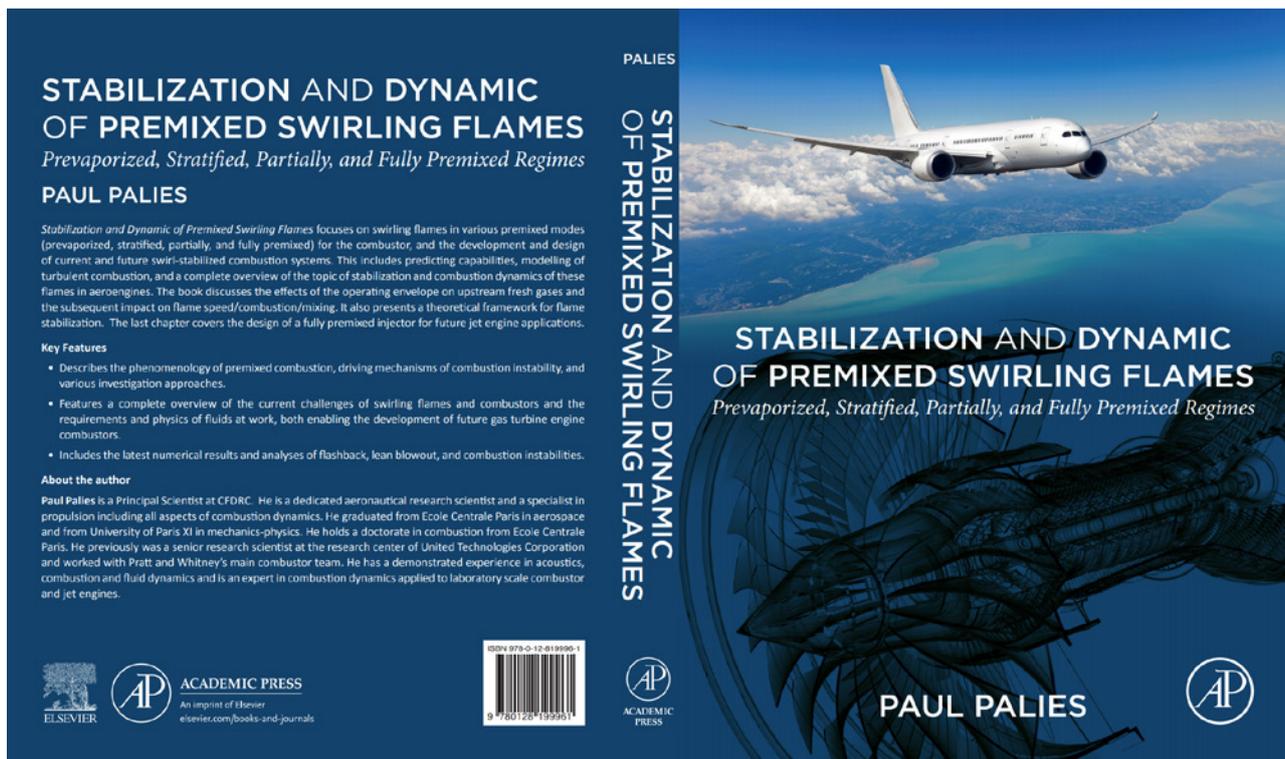
par Thierry Schuller, professeur à l'université Paul Sabatier, chercheur en combustion à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse.

L'ouvrage de Paul Palies s'adresse aux étudiants en doctorat, aux chercheurs en propulsion et combustion, aux ingénieurs, ainsi qu'à toute autre personne avec des bases scientifiques qui s'intéresse aux progrès réalisés dans l'architecture des foyers de combustion aéronautiques.

Reprenant succinctement les bases de la combustion et de la propulsion, ainsi que les principales architectures de turbines à gaz aéronautiques, le propos se concentre ensuite sur la stabilisation des flammes et de leur dynamique pour des foyers où le combustible est injecté de façon précoce avec un excès d'air avant la combustion dans le foyer. Ces technologies plus performantes et peu polluantes remplacent progressivement les chambres où le combustible est injecté tardivement dans le foyer. Le degré d'excès d'air et la qualité du mélange contrôlent les

performances de ces foyers, mais posent de nombreux défis liés à la dynamique de ces flammes. Le dernier chapitre explore notamment une piste d'architecture capable d'opérer avec un mélange combustible air se rapprochant de l'idéal avant la combustion.

Basé sur une synthèse des activités de recherche de l'auteur depuis une dizaine d'années, Paul Palies montre les progrès récents réalisés dans la compréhension des mécanismes, leur modélisation mathématique et la simulation des flammes prémélangées stabilisées par des écoulements mis en rotation par une vrille. Le domaine d'opérabilité de ces foyers, la dynamique de l'allumage, d'extinction par soufflage, les problèmes d'instabilités de combustion et de retour de flamme dans l'injecteur sont examinés. Les développements sont appuyés par une littérature scientifique abondante et récente qui



NOTES DE LECTURE

STABILIZATION AND DYNAMIC OF PREMIXED SWIRLING FLAMES PREVAPORIZED, STRATIFIED, AND FULLY PREMIXED REGIMES DE PAUL PALIES

permet au lecteur intéressé d'approfondir les concepts introduits dans les chapitres. Les résultats sont illustrés par de nombreuses planches extraites des derniers travaux dans le domaine, par des schémas de principe et des tables, très utiles au lecteur, qui permettent de fixer des ordres de grandeurs et de comparer les performances pour divers systèmes.

Je recommande tout particulièrement le livre de Paul Palies à tous les étudiants qui débutent une thèse sur les turbines à gaz. ■

NOTES DE LECTURE

JULES VÉDRINES, 250 000 KM EN AÉROPLANE PAR THIERRY MATRA AUX ÉDITIONS LES ÉTABLISSEMENTS

par Bernard Vivier, membre du comité de rédaction



Jules Védrines est sans doute l'un des pionniers de l'aviation qui eut la plus grande popularité. Naturellement, ses exploits et records de pilote d'avant 1914, comme son engagement pendant la « Grande guerre » on largement contribué à sa notoriété, mais, issu d'une famille modeste, il a toujours conservé en toute circonstances, l'esprit gouaillier et rebelle du

« titi » parisien. Il a toujours été le favori du public. Une personnalité très attachante et restée si proche...

Animé d'une volonté tenace, capable de mesurer le danger tout en l'affrontant, porté par une saine ambition de réussir dans ses entreprises, s'adaptant sans complexe à tous les milieux, l'aviation naissante lui a fourni une magnifique opportunité de se révéler.

Ce livre, écrit par Thierry Matra et publié par « Les Etablissements » nous permet de suivre en détail l'étonnant parcours d'un pilote « hors normes » à bien des égards et s'appuie sur un important travail de recherche.

De son enfance, en compagnie de son père, couvreur, sur les toits de Paris, jusqu'à ses maigres économies qu'il consomme, passionné d'aviation, pour prendre ses leçons de pilotage à l'école Blériot de Pau, il y a déjà matière à s'étonner de la volonté inébranlable du jeune Védrines et de son adaptabilité. Il passera avec brio son brevet de pilote en décembre 1910.

Ce n'est d'ailleurs pas vraiment par esprit sportif qu'il est venu à l'aviation, mais par passion et surtout parce que les prix à gagner dans les meetings aériens de l'époque, comme dans les premières courses organisées en Europe, faisaient rêver tous les « apprentis aviateur »...

Devenu pilote « maison » chez plusieurs constructeurs successifs, le jeune Védrines commence à se faire connaître et même désirer, en cette période de compétition entre les concepteurs d'aéroplanes. (Un

NOTES DE LECTURE
JULES VÉDRINES, 250 000 KM EN AÉROPLANE
PAR THIERRY MATRA AUX ÉDITIONS LES ÉTABLISSEMENTS



pilote dira de cette époque que l'intérêt pour l'aviation était tellement fort que « si un inventeur fou montait un moteur sur la porte d'une armoire à glace, il était toujours certain de trouver un pilote pour l'essayer et gratuitement ! »).

Parmi d'autres, c'est avec un Morane qu'il va remporter la fameuse course Paris-Madrid, puis Deperdussin va lui permettre de devenir recordman du monde de vitesse à Pau et d'aller ensuite gagner, aux Etats Unis, la célèbre coupe Gordon Bennett, en 1912.

L'éternel irrespectueux, devenu très patriote, rejoindra tout naturellement, mais non sans « coups de gueule », l'aéronautique militaire dès les premières manœuvres intégrant l'aviation, puis pour toute la durée de la guerre 14-18. Affecté à la MS 3, commandée par Brocard et qui saura dompter ce caractère indépendant, Jules Védrines sera le mentor avisé du jeune et bouillant Georges Guynemer, à son arrivée en escadrille. Il sera ensuite chargé de « missions spéciales » particulièrement risquées, de dépose et de reprise d'agents en territoire occupé par les troupes allemandes, dans lesquelles son sang-froid et ses qualités de pilote seront un atout apprécié du commandement.

Thierry Matra, qui a fait, pour cet ouvrage, un remarquable travail documentaire, donne, sur cette

période généralement peu développée, des informations très intéressantes et publie aussi des extraits de lettres de Védrines, qui sont passionnantes.

Après-guerre, le « gavroche sublime », comme le disait Jacques Mortane, aurait pu se reposer un peu... Ce n'était pas dans son caractère. Il posa donc son Caudron G.3 sur le toit des Galeries Lafayette, boulevard Haussmann puis replia trop tôt ses ailes un mauvais jour d'avril 1919, à Saint Rambert d'Albon, par un temps exécrable, lors d'un raid Paris-Rome demandé par l'autorité militaire.

Jules Védrines n'était pas qu'un brillant pilote. Il fut aussi écrivain, auteur de chansons, homme politique (faisant sa tournée en avion !) vedette des actualités et du cinéma et tout cela avec un naturel si sympathique, une franchise si rafraichissante que ce gros ouvrage se déguste par petites gorgées !

Un seul regret : avec une vie si remplie, une synthèse chronologique aurait été utile.

Ouvrez le livre installez-vous aux commandes et lancez donc le moteur... à la main, comme autrefois, mais, comme l'aurait dit Védrines, une vérification s'impose : « Eh dis donc, Fleur-de-nave, tu peux toujours tirer sur l'bout de bois, t'avais oublié d'ouvrir l'essence » ! ■

LES CHEVALIERS DU CIEL – TANGUY VS LAVERDURE PAR PATRICE BUENDIA ET FRÉDÉRIC ZUMBIELH AVEC DESSINS DE SÉBASTIEN PHILIPPE CHEZ DARGAUD

par Bruno Chanetz



Cet album est la suite d'un premier tome *Retour aux Cigognes* des mêmes auteurs, mais il constitue une aventure passionnante en soi. Ces auteurs ont déjà produit deux autres aventures avant cet intéressant diptyque dont la trame s'appuie sur les dernières avancées en matière de nanotechnologies.

À cause de nano-implants installés dans leurs cerveaux, des pilotes de l'armée sont contrôlés à distance par le docteur Rochette, un scientifique spécialiste des biotechnologies et des expériences sans limite. Dans l'épisode précédent, les exactions commises ont obligé Tanguy à abattre un avion dont le pilote lançait des missiles en direction de voitures sur une autoroute. Dans le présent album, Ernest Laverdure, le meilleur copain de Michel Tanguy, est lui aussi sous influence et c'est Tanguy qui est chargé de le mettre hors d'état de nuire. Il en résulte une situation cornélienne où notre héros est partagé entre son devoir et son amitié. Tanguy tente de

raconter sa version des faits à un ministre, dont il subit en retour une violente diatribe, vitupérant notamment contre un *complotiste* notoire ...injure terriblement actuelle ! Mais ce n'est pas le seul signe d'actualisation de la série, née en 1961 sous la plume de Charlier et le crayon d'Uderzo. En effet, les héros utilisent *Skype*, envoient des SMS, même aux commandes de leurs avions ... Sans avoir pris une ride ils ont pourtant 60 ans de plus. Les auteurs ne se contentent pas d'intégrer à leur récit les nouvelles pratiques quotidiennes, ils utilisent la langue de notre époque et en particulier le mot « putain » désormais employé dans le langage courant comme une banale interjection, alors qu'il constituait le « gros mot » par excellence à l'époque de la création de la BD ...

Cet album contient en outre des suppléments intéressants ou d'actualité.

On découvre une photo du hangar qu'Albert Uderzo, décédé le 24 mars 2020, avait fait construire dans son jardin des Yvelines pour abriter son Mirage III. Les portes de ce Hangar s'ornaient à l'intérieur d'images géantes des deux héros à qui il avait donné vie : Tanguy et Laverdure. Uderzo avait par la suite confié cet avion à la base des Cigognes à Dijon.

Un autre supplément intitulé *Tanguy et Laverdure face à la Covid*, rappelle en image la contribution de l'Armée de l'air à la lutte contre cette pandémie. Son auteur, le dessinateur Sébastien Philippe raconte que le lendemain où il avait griffonné les trois pages reproduites dans cet album, un SMS lui apprit la mort d'Uderzo ...

Un autre supplément traite des exercices de tir effectués chaque année à partir de la base de Solenzara en Corse par les Cigognes de Luxeuil. Il s'agit de viser une cible de quelques dizaines de centimètres tractée par un *Alphajet* à près de 500 km/h. ■

LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS

5-6 MAI 2021

15^{ème} Forum EUROPEEN IES2020
PARIS, 5-6 MAI 2021

30 ans pour éclairer l'avenir

Espace Chaptal, 23 Rue Chaptal - 75009 Paris

www.ies2020.com



Association Aéronautique et Astronautique de France

25 JUIN 2021



LE FUTUR DE L'AÉROSTATION ET DES DIRIGEABLES

Vendredi 25 juin 2021
au Centre d'arts et de culture de Meudon



Association Aéronautique et Astronautique de France



8 OCTOBRE 2021



Antoine d'Abbadie
Savant, explorateur, écrivain
Sa vie, son œuvre

Colloque à Hendaye
Vendredi 8 octobre 2021
9h00-16h30



Association Aéronautique et Astronautique de France



7-9 DÉCEMBRE 2021



Association Aéronautique et Astronautique de France

14th 3AF INTERNATIONAL CONFERENCE INTEGRATED AIR AND MISSILE DEFENCE

DECEMBER 07-09, 2021 - NICE, FRANCE



3 JUIN 2022

Ismaël Boulliau, sa vie, son œuvre

Mathématicien astronome météorologue

Colloque à Loudun
Vendredi 3 juin 2022
9h00-17h00



Association Aéronautique et Astronautique de France





Association Aéronautique
et Astronautique de France